



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUUSO PEROLAINEN  
HELSINGIN KAUPUNGIN PITKÄAIKAISTUTKIMUS TERÄSPUTKI-  
PAALUJEN KORROOSIOSTA KYLÄSAAREN MAAPERÄSSÄ –  
LÄHTÖTILANTEEN KARTOITUS

Diplomityö

Tarkastajat: Associate Professor  
Pasi Peura ja TkL Jussi Laurila  
Tarkastajat ja aihe hyväksytty  
Teknisten tieteiden tiedekuntaneu-  
voston kokouksessa 9.3.2016

## TIIVISTELMÄ

**JUUSO PEROLAINEN:** Helsingin kaupungin pitkäaikaistutkimus teräsputkipaalujen korroosiosta Kyläsaaren maaperässä – Lähtötilanteen kartoitus

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 144 sivua, 56 liitesivua

Kesäkuu 2016

Materiaalitekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Metallimateriaalit

Tarkastajat: Associate Professor Pasi Peura ja TkL Jussi Laurila

**Avainsanat:** Maaperäkorrosio, paalutus teräsputkipaaluilla, teräspaalujen pitkäaikaiskestävyys, korroosionopeus maaperässä

Tämä diplomityö on osa Helsingin kaupungin kiinteistöviraston toteuttamaa pitkäaikais- tutkimusta, jonka tarkoituksena on kartoittaa mahdollisuuksia kaavoittaa ja rakentaa Helsingin kaupungin alueella sijaitseville alueille, joita ei vielä hyödynnetä rakennuskäytössä. Näihin alueisiin kuuluu myös tutkittava Kyläsaaren ja Hermanninrannan alue.

Tämän pitkäaikaistutkimuksen toteutuskesto on 15 vuotta ja siinä kerätään tietoa teräs- ja teräsbetonipaalujen korroosiokäyttäytymisestä maaperässä, joka sisältää sekalaista täytömaata ja on lisäksi mikrobiologisen korroosion kannalta aktiivisella alueella. Kerätyn tutkimustiedon perusteella tehdään rakentamiseen liittyviä päätöksiä, jotka vaikuttavat 100 vuoden aikajänteellä.

Korroosiotutkimuksen aloittaa tämä aiheita käsittelevästä kirjallisuusselvityksestä ja kokeellisesta osuudesta koostuva diplomityö. Tämän työn kokeellinen osuus sisältää tutkitavan alueen maaperä- ja vesinäyteanalyyskejä sekä valmistelevat mittaukset varsinaiselle korroosiokokeelle, joka toteutetaan todellisessa korroosioympäristössä teräspaaluilla, jollaisia alueen varsinaisessakin rakennustyössä käytettäisiin. Valmistelevilla mittauksilla määritetään mahdollisimman tarkasti koekappaleiden alkuperäiset mitat, jotta jatkotutkimuksissa saatavia korroosiomittaustuloksia voitaisiin verrata niihin uskottavasti ja mahdollisimman pienellä epätarkkuudella. Mittaustulokset ja referenssimateriaalit arkistoitin sellaiseen muotoon, että niitä voidaan hyödyntää tulevaisuudessa. Työn tulosten perusteella tehtiin alustavat jatkotutkimussuunnitelmat vuosille 2017-2030.

## ABSTRACT

**JUUSO PEROLAINEN:** A long-term soil corrosion study of steel piles in Kyläsaari area in Helsinki - Definition of the initial state

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 144 pages, 56 Appendix pages

June 2016

Master's Degree Programme in Materials Engineering

Major: Metallic materials

Examiners: Associate Professor Pasi Peura and Lic.Sc. (Tech.) Jussi Laurila

**Keywords:** Underground corrosion, steel pipe piles, long-term endurance of steel piles, corrosion rate in soil

This Master's thesis is a part of a long-term soil corrosion study conducted by the Real Estate Department of the City of Helsinki. The aim of this long-term study is to chart the possibilities to plan and build on land owned by the City of Helsinki that has not yet been utilised. These areas include Kyläsaari and Hermanninranta area that have been studied in this Master's thesis.

The execution period of the long-term study is 15 years. During this time, information is accumulated about the corrosion behavior of steel pipe piles in a soil that consists of mixed fill. For comparison purposes a few reinforced concrete piles are included in the study. Microbial activity resulting in accelerated corrosion of steel is also suspected to be present in this soil. Resolutions concerning the area with 100 year time span will be made based on the accumulated information.

The long-term corrosion study begins with this Master's thesis, which consists of a literature survey of underground corrosion and an experimental part. The experimental part includes soil and water analyses and preliminary measurements for the actual corrosion experiment, which is conducted in actual corrosion environment with steel pipe piles that would be used in actual deep foundations of the area. These preliminary measurements specify the original dimensions of the specimen piles as well as possible in order to make further study possible with as little inaccuracy as possible. In further studies the results of these preliminary measurements together with reference sample will be compared with actual corrosion experiment results. Results and reference materials are stored for future investigations. Based on the results, preliminary research plans for further study were scheduled for years 2017-2030.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Helsingin kaupungin kiinteistöviraston toimeksiantona Tampereen teknillisen yliopiston Materiaaliopin laitoksella. Tämä diplomityö aloittaa vuoteen 2030 jatkuvan korroosion pitkäaikaistutkimuksen.

Haluan kiittää diplomityöni ohjaajia Associate Professor Pasi Peuraa ja projektipäällikkö, tekniikan lisensiaatti Jussi Laurilaa työnaikaisesta tukemisesta ja ohjauksesta. Lisäksi kiitän Jussi Laurilaa avustamisesta työn mittausten kanssa.

Suuret kiitokset kuuluvat Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekniselle osastolle ja projektipäällikkö Miia Paatsemalle mahdollisuudesta päästä tekemään tätä diplomityötä ja sitä kautta osallistumaan tähän mielenkiintoiseen pitkäaikaistutkimukseen. Lisäksi kiitokset Miia Paatsemalle, että jaksoit kärsivällisesti odottaa työn valmistumista, vaikka sen aikataulu venyi.

Erityiskiitokset Jouko Törnqvistille, joka toimi työn aikana erityisasiantuntijana, työn kommentoinnista ja korjausehdotuksista. Ilman Jouko Törnqvistin tietämystä olisi tämä työ jäänyt vajaavaiseksi.

Lisäksi haluan kiittää muita diplomityön kokeellisen osuuden eri vaiheisiin osallistuneita yhteistyötahoja: SSAB:ta ja Teemu Yli-Koveroa, Helsingin kaupungin rakentamispalvelu Staraa ja Jari Hurria, Hämeen Teollisuuspinnoitus Oy:tä ja Jani Juseliusta, Auranmaan Teräspaaluttajat Oy:tä sekä muita mukana olleita.

Kiitokset TTY:n Materiaaliopin laitokselle henkilökuntineen, että minulla on ollut mahdollisuus opiskeluiden ohella tehdä tutkimusapulaisen töitä vuosien 2011–2015 aikana ja siten kasvattaa osaamistani myös käytännön materiaalitutkimuksen saralla.

Kiitos äiti ja isä, että jaksotte tukea henkisesti ja taloudellisesti koko pitkäksi venyneen opiskeluaikani ajan. Vaikeinakin aikoina olette osanneet lohduttaa ja rohkaista eteenpäin.

Vihdoinkin ja toisaalta valitettavasti nyt jo päättyy pitkä taipaleeni Tampereen teknillisellä yliopistolla. Näihin vuosiin on mahtunut paljon hienoja ja kasvattavia kokemuksia ja olen oppinut tuntemaan paljon erilaisia ihmisiä opiskeluiden, töiden ja opiskelijatoiminnan kautta. Opiskeluaika on ihmisen parasta aikaa, mutta aika aikaa kutakin.

Tampereella, 13.5.2016

Juuso Perolainen



# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	YMPÄRISTÖN VAIKUTUS KORROOSION .....	4
2.1	Korroosio luonnon vesissä .....	6
2.1.1	Veden korroosio-ominaisuuksia .....	6
2.2	Korroosiomuodot vesistöissä .....	8
2.2.1	Pistekorroosio .....	8
2.2.2	Rako- tai piilokorroosio .....	11
2.2.3	Muut korroosion esiintymismuodot .....	12
3.	MAAPERÄKORROOSIO .....	15
3.1	Yleinen korroosio .....	15
3.2	Paikallinen korroosio .....	15
3.2.1	Galvaaninen korroosio .....	16
3.2.2	Väkevyyserokorroosio .....	17
3.3	Maaperäkorroosioon vaikuttavat tekijät .....	19
3.3.1	Maalajit ja maaperän koostumus .....	19
3.3.2	Happipitoisuus .....	23
3.3.3	Ominaisvastus.....	25
3.3.4	Happamuus ja pH.....	27
3.3.5	Redox-potentiaali.....	28
3.3.6	Eri kemialliset yhdisteet .....	29
3.3.7	Mikrobiologiset tekijät .....	29
3.4	Maaperäkorroosiotutkimus .....	32
3.4.1	Maaperäkorroosiotutkimus aikaisemmin Suomessa.....	33
3.4.2	Maaperäkorroosiotutkimus muissa Pohjoismaissa .....	39
3.4.3	Maaperäkorroosiotutkimus Yhdysvalloissa .....	44
4.	TÄYTEMAA .....	47
4.1	Tuhka .....	48
4.1.1	Tuhkan ominaisuudet.....	48
4.1.2	Kyläsaaren ympärille läjitetty tuhka .....	51
5.	PAALUMATERIAALIT .....	52
5.1	Teräspaalut .....	52
5.1.1	Rakenneteräket S355J2H, S440J2H ja S550J2H .....	54
5.2	Paalujen pinnoitus.....	55
5.2.1	Sinkkipohjaiset pinnoitteet.....	56
5.2.2	Maalit .....	59
5.2.3	Kivihiilitervapohjaiset pinnoitteet .....	61
5.2.4	Komposiittipinnoitteet.....	62
5.2.5	Kaasu- ja öljyputkissa käytetyt pinnoitteet .....	62
6.	MAAPERÄKORROOSION TUTKIMUSMENETELMÄT .....	64
6.1	Painohäviömittaus .....	64

6.2	Pinnankarheuden määrittäminen optisella profilometrialla .....	65
6.3	Polarisaatiomittaukset .....	67
6.3.1	Polarisaatiokäyrien mittaaminen.....	67
6.3.2	Polarisaatiokäyrien analysoiminen .....	69
7.	KOKEELLINEN OSUUS .....	73
7.1	Paalutuspisteiden vertailu Kyläsaaren korroosioympäristöön .....	73
7.1.1	Kyläsaaren maaperä .....	74
7.1.2	Kyläsaaren alueen läjitys 50-luvulta 70-luvulle .....	75
7.1.3	Paalutuspisteiden maanäytteet .....	77
7.1.4	Orsivesi Kyläsaarella.....	89
7.2	Paalujen käsittely ja identifiointi .....	95
7.3	Paalutusta edeltävät mittaukset .....	97
7.3.1	Seinämävahvuusmittaus .....	97
7.3.2	Halkaisijamittaus .....	101
7.3.3	Metripainomittaus .....	102
7.3.4	Pintojen optinen profilometria .....	103
7.3.5	3D-laserskannaus .....	106
7.3.6	Potentiostaattimittaukset .....	108
7.4	Putkipaalujen maalaus .....	112
7.4.1	Maalipinnoite.....	113
7.4.2	Maalipinnoitteen paksuusmittaus .....	114
7.5	Paalutustyö .....	116
8.	MITTAUSTULOSTEN JA MUIDEN HAVAINTOJEN ANALYSOINTI .....	123
8.1	Maaperänäytteiden analyysit .....	123
8.2	Potentiostaattimittaukset .....	125
8.3	Seinämävahvuuden korroosioestimaatti .....	125
9.	JATKOTUTKIMUKSET .....	128
9.1	Jatkotutkimusten aikataulu .....	128
9.1.1	Jatkotutkimusten mittaukset ja tutkimussuunnitelma 2017 .....	129
9.1.2	Maaperä- ja vesianalyysit jatkotutkimuksissa .....	130
9.2	Referenssinäytteiden ja datan säilytys .....	131
10.	YHTEENVETO .....	132
	LÄHTEET .....	134

LIITE 1: SIDEAINEEN MUKAAN NIMETYT MAALITYYPIT RYHMITETTYINÄ  
KUIVUMISTAVAN JA LIUOTTEEN PERUSTEELLA

LIITE 2: MAAPERÄ- JA VESINÄYTEANALYYSITULOKSET

LIITE 3: MAALAJIMÄÄRITYSTEN TULOKSET

LIITE 4: TERÄSPUTKIPAALUJEN VASTAANOTTOTODISTUS

LIITE 5: BETONIPAALURAPORTTI

LIITE 6: SEINÄMÄVAHVUUSMITTAUSTEN TULOKSET

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

CMIC	Chemical microbially influenced corrosion, sulfaatteja pelkistävien bakteerien kemiallinen tapa vaikuttaa hapettomaan raudan korroosioon
EMIC	Electrical microbially influenced corrosion, sulfaatteja pelkistävien bakteerien sähköinen tapa vaikuttaa hapettomaan raudan korroosioon
KSV	Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluvirasto
MIC	Microbiologically influenced corrosion / microbially induced corrosion, mikrobiologisten tekijöiden aiheuttama korroosio
NBS	National Bureau of Standards, National Institute of Standards and Technology -viraston nimi vuosina 1901-1988
NHE	Normal hydrogen electrode, vetyvertailuelektrodi
NIST	National Institute of Standards and Technology, Yhdysvaltain kaup- paministeriön alaisuudessa toimiva standardoimisvirasto
SCE	Saturated calomel electrode, kylläinen kalomelielektrodi
SRB	Sulphate-reducing bacteria, sulfaatteja pelkistävät bakteerit
SSAB	Svenskt Stål AB, Ruotsissa 1918 perustettu teräksen tuottaja, jonka kanssa Rautaruukki Oyj fuusioitui 2014
$\beta_a$	Anodisen Tafelin suoran kulmakerroin
$\beta_c$	Katodisen Tafelin suoran kulmakerroin
E	Potentiaali
Eh	Redox-potentiaali
$E_{corr}$	Korroosiopotentiaali
$i_{corr}$	Korroosiopotentiaalın ja Tafelin suorien leikkauspisteestä määritetty virrantiheys, jota joskus kutsutaan korroosionopeudeksi
$R_a$	Pinnankarheussuure, joka on profiilin keskiviivasta tapahtuvan poikkeaman suuruuden aritmeettinen keskiarvo
$R_q$	Pinnankarheussuure, joka on keskiviivasta tapahtuvan poikkeaman suuruuden neliöllinen keskiarvo
$R_p$	Polarisaatiovastus
$R_z$	Profiilin näytepituudella esiintyvän korkeimman huipun ja syvim- män laakson välinen korkeus

### Maalajinimikkeiden lyhenteet

CGr	Karkea sora (engl. coarse gravel)
Cl	Savi (engl. clay)
CSa	Karkea hiekka (engl. coarse sand)
CSi	Karkea siltti (engl. coarse silt)
FGr	Hieno sora (engl. fine gravel)
FSa	Hieno hiekka (engl. fine sand)
FSi	Hieno siltti (engl. fine silt)
Gr	Sora (engl. gravel)
Hi	Hienoaines
Hk	Hiekka
HkMr	Hiekkamoreeni
hkSi	Hiekkainen siltti

Ki	Kivet
laSa	Laiha savi
Lj	Lieju
ljSa	Liejusavi
Lo	Lohkareet
MGr	Keskisora (engl. medium gravel)
MSa	Keskihiekkä (engl. medium sand)
MSi	Keskisiltti (engl. medium silt)
Sa	Savi tai hiekka (engl. sand) - tarkistettava käyttöyhteyden mukaan
saGr	Hiekkainen sora (engl. sandy gravel)
saSi	Savinen siltti
saSiTä	Savinen silttitäyttö
SaTä	Savitäyttö
Si	Siltti (myös engl. silt)
siHkTä	Silttinen hiekkatäyttö
SiMr	Silttimoreeni
Sr	Sora
srHk	Sorainen hiekka
srHkTä	Sorainen hiekkatäyttö
SrMr	Soramoreeni
Tv	Turve

# 1. JOHDANTO

Korroosio-sanaa käytetään yleensä kuvaamaan kaikkien rakennemateriaalien kemiallista tai sähkökemiallista tuhoutumista ympäristön vaikutuksesta [1]. Korroosioilmiöt voidaan jaotella useilla erilaisilla tavoilla. Jako voi perustua korroosioympäristöön, korroosion esiintymismuotoon tai vallitsevaan korroosiomekanismiin. Tässä työssä rajoitutaan näistä ilmiöistä niihin, jotka vaikuttavat metalleilla ja erityisesti rakenneteräksillä maarakennuskäytössä.

Maaperän aiheuttama korroosio on syytä ottaa huomioon, kun maahan suunnitellaan pitkäikäisiä rakenteita, sillä näiden rakenteiden uusiminen tai korjaaminen on haastavaa tai jopa mahdotonta toisin kuin maanpinnan yläpuolella olevien. Maahan asennettavat putkistot ovat korjattavissa käytön aikana, sillä niiden asennussyvyys ja -tapa mahdollistavat pääsyn korroosiolle altistuviin kohtiin, kun taas rakentamista varten tehtävien paalujen on kestävä koko rakennuksen käyttöikä, sillä näihin ei ole pääsyä vaikuttamatta niiden yläpuolisiin rakenteisiin.

Maaperässä tapahtuvan korroosion merkittävä ongelma on, että sen ennalta havainnoiminen ja siten ehkäiseminen ovat vaikeita, vaikka se on yleensä hitaampaa kuin esimerkiksi meri- tai prosessivesissä tapahtuva syöpyminen. Tällöin esimerkiksi putkistovuoto havaitaan vasta, kun putkiston kuljettamaa nestettä tai kaasua esiintyy sen ulkopuolella.

Paalutus on pohjarakennusmenetelmä, jota käytetään, kun maaperä rakennettavalla alueella ei ole riittävän kantava rakentamista varten. Paalujen avulla rakennusten ja rakennelmien aiheuttama kuormitus siirretään pehmeiden kerrosten läpi kovaan pohjaan asti. Paalutukseen käytetään nykyään yleensä teräsputkipaaluja tai teräsbetonipaaluja, joilla kummallakin on etunsa ja heikkoutensa.

Teräsbetonipaalutuksen etuna teräsputkipaaluihin nähden on, että yleensä tarvitaan vähemmän paaluja kantamaan sama kuorma kuin teräsputkipaaluilla toteutetussa paalutuksessa. Lisäksi teräsbetonipaalutusta pidetään yleisesti edullisempänä kuin teräsputkipaalutusta, mutta kustannukset ovat aina tapauskohtaisia riippuen paalutustyön yksityiskohdista. Betonipaalujen heikkoutena teräsputkipaaluihin nähden voidaan pitää niiden suurempaa alttiutta vaurioitumiselle niitä käsiteltäessä [2].

Teräsputkipaaluja asennettaessa voidaan käyttää pienempiä koneita kuin teräsbetonipaaluja asennettaessa, jolloin työskentely onnistuu pienemmilläkin tonteilla ja aiheuttaa vähemmän tärinähaittaa ympäristön muille rakennuksille [2-5]. Tämä on osaltaan lisännyt näiden paalujen käyttöä pientalorakentamisessa. Lisäksi teräsputkipaaluja käytettäessä

materiaalin käyttö on tehokkaampaa kuin betonipaalutuksessa, sillä ylijäävät paalun osat ovat täysin kierrätettävissä [2-5]. Tässä diplomityössä käsitellään maaperässä tapahtuvaa korroosiota pääasiassa teräsputkipaaluihin keskittyen, mutta teräsbetonipaalujen käyttöön liittyen sivutaan yksittäisiä asioita, sillä pitkäaikaistutkimuksessa, jonka osana tämä diplomityö tehdään, on mukana referenssimateriaalina teräsbetonipaaluja.

Helsingin kaupungin asukasluku on kasvanut voimakkaasti viimeiset 20 vuotta ja ennusteiden mukaan kasvu jatkuu tulevaisuudessakin [6; 7]. Tämä kasvattaa painetta jo vuosia ongelmallisena olleeseen asuntotilanteeseen ja lisää tarvetta uudisrakentamiselle.

Ennen tätä Helsingin kaupungin pitkäaikaista korroosiotutkimusta vastaavaa tutkimustyötä on tehty pääkaupunkiseudulla Pasilan alueella [8]. Tässä tutkimuksessa tutkimuskohteena on Kyläsaaren ja Hermanninrannan alue, jonka rakennuskanta on nykyisellään vielä matala ja alueella on lähinnä pienimuotoista yritystoimintaa. Rakentaminen alueen ympärillä on kuitenkin ollut voimakasta, sillä sen pohjoispuolella on valmistunut 2000–2015 Arabianrannan alue [9] ja tällä hetkellä rakenteilla on alueen eteläpuolella Kalasataman alue, josta suunnitelmien mukaan edetään asteittain pohjoisen suuntaan [10].

Helsingin kaupungin pitkäaikaisen korroosiotutkimuksen aloittaa tämä aihetta käsittelevä diplomityö, joka koostuu kirjallisuusselvitykseen perustuvasta teoriaosuudesta sekä kokeellisesta osuudesta. Teoriaosuus kattaa luvut 2-6. Ensimmäisenä käsitellään yleisesti korroosiota ilmiönä ja johdatuksenomaisesti korroosiota vesiympäristöissä, sillä näitä on tutkittu enemmän. Vesi vaikuttaa korroosioon maaperässäkin, mutta on olemassa korroosionmuotoja, jotka ilmenevät avoimemmassa vesiympäristössä, kuten vesistöissä, mutta eivät maaperässä.

Luku 3 on tämän diplomityön keskeisin teorialuku, sillä siihen on koottu maaperässä tapahtuvaan korroosioon liittyvät keskeisimmät asiat. Käsiteltäviä näkökulmia ovat maaperässä esiintyvät korroosionmuodot ja maaperän eri ominaisuuksien, kuten maalajin, ominaisvastuksen tai esiintyvien mikrobien, vaikutus korroosioon. Lisäksi esitellään muualla aikaisemmin tehtyjä korroosiotutkimuksia ja niiden tuloksia.

Helsingin kaupungin korroosiotutkimukseen liittyviä erityispiirteitä kuvaillaan luvuissa 4-6. Luvussa 4 käsitellään polttolaitoksissa syntyviä tuhkia, sillä tutkimuksen ennakkotietona on, että Kyläsaaren ympäristössä tuhkaa olisi käytetty maantäyttöaineena. Luvussa 5 käsitellään pitkäaikaistutkimuksessa käytettyjä teräsputkipaaluja ja lisäksi esitellään lyhyesti erilaisia korroosiosuojapinnoitteita. Tutkimusmenetelmiä, joilla maaperän aiheuttamaa metallien syöpymistä voidaan tutkia, on käsitelty luvussa 6. Näillä menetelmillä tehdyt mittaukset on esitetty kokeellisessa osuudessa.

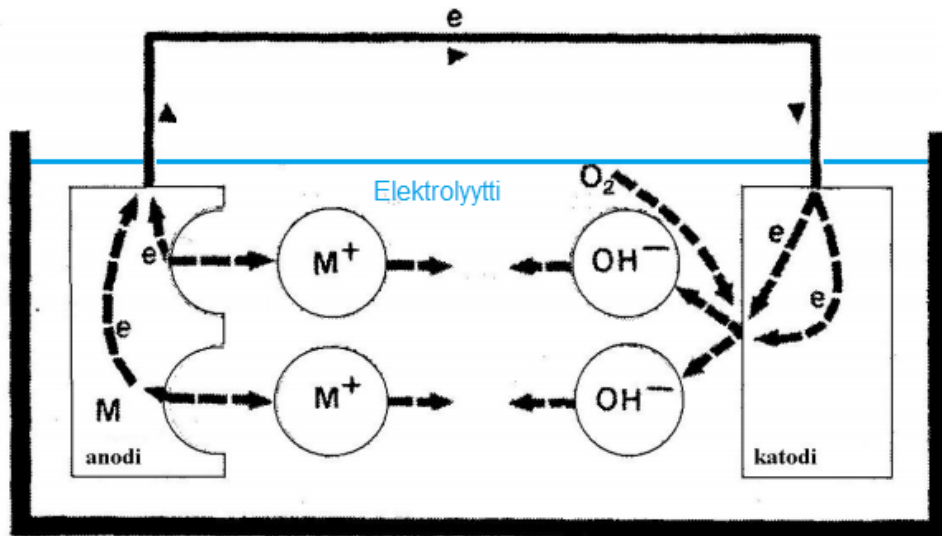
Luvussa 7 esitellään tämän diplomityön kokeellinen osuus. Se sisältää tutkittavan alueen maaperä- ja vesinäyteanalyysijä sekä valmistelevat mittaukset varsinaiselle korroosiokokeelle, joka toteutetaan todellisessa korroosioympäristössä teräspaaluilla, jollaisia alueen varsinaisessakin rakennustyössä käytettäisiin. Valmistelevilla mittauksilla määritetään

mahdollisimman tarkasti koekappaleiden alkuperäiset mitat, jotta jatkotutkimuksissa saatavia korroosiomittaustuloksia voidaan verrata niihin uskottavasti ja mahdollisimman pienellä epätarkkuudella.

Luvun 7 mittaustuloksia analysoidaan luvussa 8 ja niistä esitetään joitain päätelmiä ja arvioita. Mittaustulosten ja niistä tehtyjen päätelmien jälkeen kokeellista työtä käsittelevän osuuden päättää luvussa 9 esitetyt jatkotutkimustarpeet, jotka listaavat alustavasti pitkäaikaistutkimuksen vuoden 2017 toimintavaiheita ja luo lyhyen katsauksen myös vuosina 2020–2030 tehtäviin tutkimuksiin.

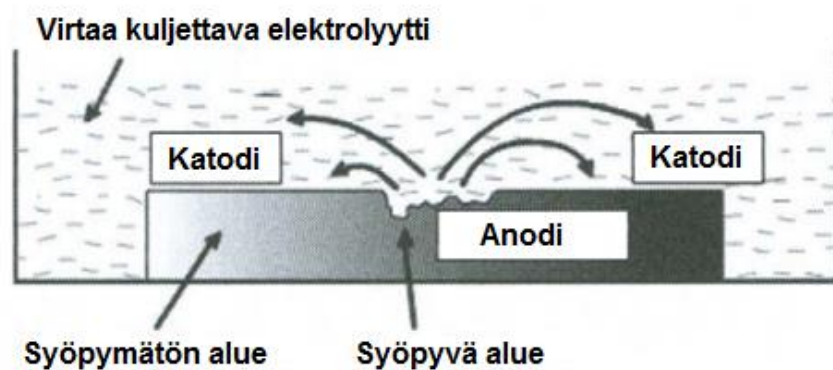
## 2. YMPÄRISTÖN VAIKUTUS KORROOSION

Ympäristön aiheuttama korroosiovaikutus teräksillä on luonteeltaan sähkökemiallista korroosiota. Sähkökemiallisessa korroosiossa muodostuu sähkökemiallinen pari, joka koostuu kahdesta elektrodista, katodista ja anodista. Se vaatii toimiakseen myös sähköä johtavan vesiliuoksen, elektrolyytin. Tämä korroosiopari on esitettyä kuvassa 1.



**Kuva 1.** Klassinen korroosioparin kaavio, katodireaktiona  $O_2 + 2H_2O + 4e^- = 4OH^-$ ,  $M$  on metalli-ioni. Muokattu lähteestä [1].

Korroosiopari muodostuu kahden eri potentiaalin omaavan metallipinnan osan tai kahden eri metallin välille. Saman metallin pinnalla potentiaaliero voi johtua esimerkiksi pinnalla olevista erilaisista kerroksista tai koostumuseroista tai ympäröivän liuoksen väkevyys-eroista. Saman metallin pinnalle syntyvän korroosioparin periaate on esitettyä kuvassa 2.



**Kuva 2.** Korroosioparin periaate, kun katodi ja anodi ovat saman metallin pinnalla, muokattu lähteestä [11].



Parin katodiksi muodostuu korkeamman potentiaalin metallipinta tai sähkökemiallisesti jalompi metalli, kun taas anodina toimii matalamman potentiaalin pinta tai epäjalompi metalli. Katodilla tapahtuu pelkistymistä ja anodilla hapettumisreaktioita, joka ilmenee korroosiona, sillä metallia liukenee liuokseen.

Ilman elektrolyyttiä korroosiota ei tapahdu ja metallipinnan kosteus onkin suurin korroosionopeuteen vaikuttava tekijä. Pinnan kostumiseen puolestaan vaikuttavat ilmastolliset tekijät, kuten lämpötila ja suhteellinen kosteus, ja rakenteelliset seikat, kuten pinnan asento ja sijainti [12].

Korroosionopeutta lisäävät myös ilman epäpuhtaudet, sillä ne voivat reagoida pintamateriaalin kanssa ja muodostaa pinnalle uusia yhdisteitä [13]. Merivedestä ilmaan siirtyvät kloridit ja pääasiassa teollisuudesta peräisin oleva rikkidioksidi ovat keskeisimmät epäpuhtaudet [12].

Ilmastollinen korroosio ei ole tämän diplomityön kannalta merkittävä, koska työn tarkastelun kohde on maaperässä tapahtuvassa korroosiossa. Se on kuitenkin kokonaisuuden kannalta syytä esitellä yleisesti. Ilmastolliseen korroosioon tarvittava vesikalvo saavutetaan yleensä, kun ilman suhteellinen kosteus on 80-90 %, mutta ilman rikkidioksidipitoisuus laskee tätä kosteusrajaa esimerkiksi teräksillä. Jo alkaneen korroosion ylläpitämiseen voi riittää alhaisempikin ilman kosteuspitoisuus [12]. Suomessa kosteuden kannalta ilmastolliselle korroosiolle otolliset olosuhteet pätevät suurimman osan vuodesta [14].

Lämpötilan kasvamisen vaikutuksesta korroosio yleensä kiihtyy, mutta toisaalta pintojen kuivuminen nopeutuu. Puhtaassa ilmassa korroosiota ei tapahdu alle 0 °C, mutta epäpuhtaudet mahdollistavat korroosion alle 0 °C, sillä suolat alentavat elektrolyyttinä toimivan veden jäätymispistettä [12].

Standardissa SFS-EN ISO 12944-2 ilmastoympäristöt luokitellaan kuuteen ilmastorasitusluokkaan. Tämä luokitus on esitettyä taulukossa 1. Taulukossa 1 on listattu myös standardikoekappaleen paino- ja paksuushäviöt, joiden mukaan rasitusluokka voidaan määrittää.

**Taulukko 1. Ilmastorasitusluokat [13].**

Rasitusluokka	Rasitusluokan kuvaus	Niukkahiilinen teräs (koeaikana 1 vuosi)	
		Painohäviö (g/m <sup>2</sup> )	Paksuushäviö (µm)
C1	Hyvin lievä	≤ 10	≤ 1,3
C2	Lievä	10-200	1,3-25
C3	Kohtalainen	200-400	25-50
C4	Ankara	400-650	50-80
C5-I	Erittäin ankara (teollisuus)	650-1500	80-200
C5-M	Erittäin ankara (meri)	650-1500	80-200

Vastaava jako eri rasitusluokkiin löytyy myös standardista SFS-EN ISO 9223, joka on yhtäpitävä SFS-EN ISO 12944-2 arvojen kanssa [13]. SFS-EN ISO 9233 ei kuitenkaan tee jakoa C5-luokan sisällä, vaan nimeää uuden, vielä ankaramman luokan CX. Tässä standardissa esitellään myös laskennalliset kaavat ilmastollisen korroosion arviointiin [14].

Ilmastollisen korroosion vaikutusta varten on tapana luokitella ilmasto-olosuhteet maa-seutu-, kaupunki-, teollisuus- ja meri-ilmastoihin [12]. Taulukossa 1 esitelty standardin SFS-EN ISO 12944-2 mukaiset rasitusluokat voidaan myös jakaa näihin, sillä standardi nimeää esimerkit ulko- ja sisätilaolosuhteista kullekin rasitusluokalle. Rasitusluokkaa C1 vastaa vain lämmitettyjen, ilmaltaan puhtaiden rakennusten sisätilat. Standardi SFS-EN ISO 9223 nimeää raja-arvoja epäpuhtauksille eri ilmastoympäristöissä [14].

## 2.1 Korroosio luonnon vesissä

Luonnon vesiympäristöt voidaan jakaa makeisiin pintavesiin, pohjavesiin ja merivesiin. Suomessa makeiden pintavesien suolapitoisuus on matala ja ne ovat kovuusarvolla mitattuna pehmeitä. Veden kovuus määritellään sen sisältämien kalsium- ja magnesiumsuolojen perusteella. Suomalaisten pintavesien pH on tyypillisesti 6,5-7 eikä yhdessä pienen kovuutensa kanssa muodosta korroosiolta suojaavaa kalvoa metallipinnalle [15].

Suomessa pohjavedet ovat tyypillisesti suolapitoisempia ja kovempia kuin pintavedet. Pohjavesien pH on tyypillisesti 6-7. Niissä on tyypillisesti korkea rauta- ja hiilidioksidipitoisuus. Paikoitellen pohjavesissä voi esiintyä myös paljon klorideja, mutta merkittävin syövyttävyys johtuu hiilidioksidista [15]. Turve- ja sulfidimaiden (alunamaat) alueilla vesien pH voi olla merkittävän hapan ja niiden metallien syövyttävyys johtuu rikkiyhdisteistä, jopa rikkihaposta [16].

Suomalaiset merivedet ovat osa murtovesivyöhykettä eli sen suolapitoisuus on vain kymmenesosa valtamerien pitoisuudesta ja vaihtelee 0,2-0,7 % välillä. Merivesiemme pH-arvo on 6,5-8. Suolapitoisuutensa vuoksi rannikkojemme merivedet aiheuttavat pistekorrosiovaaran, vaikka ne eivät ole yhtä syövyttävät kuin valtamerien vedet [15]. Meren suolapitoista vettä voi kulkeutua vedenpinnan nousun vaikutuksesta myös jokien alajuoksuille ja suistoalueille.

### 2.1.1 Veden korroosio-ominaisuuksia

Luonnonvesien pH-arvo riippuu yleensä hiilidioksidipitoisuudesta suhteessa vetykarbonaattiin ja voi vaihdella jopa välillä 1,5–10. Kun pH on alle 5 eli ympäristö on hapan, teräs syöpyy vetyä kehittäen ja korroosionopeus on riippuvainen pH:sta ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Neutraalilla alueella pH-arvoilla 5–10 teräksen korroosionopeuden määrää hapen diffuusionopeus ja käytännön korroosiotapauksille juuri pH-arvojen 5–8

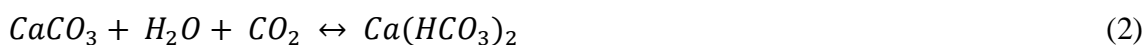
alue on merkittävä, jos happea on läsnä. Emäksisellä alueella, pH:n ollessa yli 10, korroosionopeus hidastuu, mutta vähän happea sisältävässä ympäristössä se voi teräksen tapauksessa kiihtyä pH-arvon 13 yläpuolella [15]. Näin korkeita veden pH-arvoja esiintyy kuitenkin ainoastaan joissain teollisuusympäristöissä.

Alkaliteetillä tarkoitetaan veden kykyä puskuroida happoja eli vastustaa pH:n muuttumista. Veden alkaliteetin määrittävät pääasiassa vetykarbonaatti-, karbonaatti- ja hydroksyyli-ionien määrä. Veden kovuuden määrittävät puolestaan kalsium- ja magnesiumsuolat. Näistä yhdisteistä voi muodostua suojaava kalvo, jos tasapaino veden hiilidioksidipitoisuuden kanssa saavutetaan ja vedessä on riittävästi happea. Veteen liuenneen hiilidioksidin ja hapen määrä vaikuttavatkin vedessä tapahtuvaan korroosioon [15].

Yleisen maarakentamisen kannalta on tärkeää huomioida myös vedessä esiintyvä aggressiivinen hiilidioksidi, sillä se on betonin kannalta riskitekijä. Veden sisältämästä hiilidioksidista vain pieni osa esiintyy hiilihappomuodossa kaavan (1) mukaisesti loppuosan pysyessä kaasumaisena.



Hiilihappo, vapaa hiilidioksidi, muuttaa maaperässä, tai esimerkiksi betonimateriaalissa, esiintyvän kalsiitin vesiliukoiseksi vetykarbonaatiksi kaavan (2) mukaisesti.



Vetykarbonaatti ei pysy stabiilina, ellei vedessä ole kaavan (2) mukaisen reaktion edellyttämän tasapainon mukaista määrää hiilidioksidia. Tämä tasapainon ylläpitämiseen tarvittava hiilidioksidi ei kykene liuottamaan lisää kalsiumkarbonaattia eikä siten ole esimerkiksi betonille aggressiivista [17].

Muita vesistöissä ilmenevään korroosioon vaikuttavia kemiallisia yhdisteitä ovat rikkivedyt, sulfidit, sulfaatit ja kloridit. Nämä lisäävät korroosiota myös maaperässä. Mikrobiologinen korroosio liittyykin rikkiyhdisteiden esiintyminen. Kloridit puolestaan voivat rikkoa metalleja suojaavan kalvon ja aiheuttaa pistekorroosiota. Lisäksi veteen lienneet suolat kasvattavat veden sähkönjohtavuutta, jolloin korroosion paikallisuus lisääntyy, sillä anodisia alueita syntyy kauemmas toisistaan [15].

Veden lämpötila vaikuttaa korroosioon ja sen luonteeseen monella tavalla. Lämpötilan nousu edistää kinetiikasta riippuvia korroosiotekijöitä, sillä korkeammassa lämpötilassa korroosioreaktiot tapahtuvat nopeammin, sähkönjohtavuus kasvaa ioniliikkuvuuden lisääntyessä ja hapen diffuusionopeus nousee. Toisaalta lämpötilan nousu vähentää hapen liukoisuutta, mutta korroosion se vaikuttaa merkittävästi vasta yli 80 °C lämpötiloissa [15].

Virtausnopeus vaikuttaa korroosioon, sillä suurilla nopeuksilla muodostuu turbulenteja virtauksia, jotka edistävät eroosio- ja kavitaatiokorroosiota. Suuri virtausnopeus edistää syövyttävien aineiden siirtymistä metallin pinnalle ja samalla korroosiotuotteiden poistumista pinnalta. Toisaalta seisova vesi edesauttaa konsentraatioparien syntyä mahdollistaen piste- tai rakokorroosion [15].

## **2.2 Korroosiomuodot vesistöissä**

Vedessä oleva kappale voi altistua korroosion useille eri esiintymismuodoille. Näitä ovat yleinen korroosio, pistesyöpyminen, piilo- tai rakokorroosio, eroosio- ja kavitaatiokorroosio.

Maaperän paalutuksen kannalta näistä muodoista lähinnä yleinen korroosio on huomion-arvoinen, mutta piste- ja paikallissyöpymistäkin voi esiintyä. Piilo- tai rakokorroosiota voi esiintyä lähinnä paaluhatun, kärjen ja paaluelementtien välisissä liitoskohdissa, mutta väkevyyserokorroosio, jonka erityismuodoksi tämä voidaan luokitella, on paalutuksille merkittävä ja sitä käsitellään maaperäkorroosion yhteydessä. Eroosio- ja kavitaatiokorroosio eivät vaikuta maahan tehtävien rakenteisiin, sillä ne riippuvat veden virtausnopeudesta eikä se ole maaperässä riittävän suuri aiheuttamaan näitä.

Yleinen eli tasainen korroosio on lähes tasaisella nopeudella tapahtuvaa metallipinnan sähkökemiallista liukenemista koko syöpyvän kappaleen alueelta [15; 18; 19]. Sitä käsitellään tarkemmin maaperäkorroosion yhteydessä.

### **2.2.1 Pistekorroosio**

Pistekorroosiossa metallin syöpyminen keskittyy pienille alueille metallin pinnalle synnyttäen paikallisia pistemäisiä terävärajaisia kuoppia, jotka kasvavat ja johtavat nopeasti vaurioon [15; 18-20]. Syöpymät ovat usein syviä ja vaikeasti havaittavia. Toisinaan pistesyöpyminen tekee metallin pinnan sienimäisen karheaksi [19].

Tätä korroosiomuotoa pidetään vaarallisena, koska syöpymien syvyyden mittaaminen on vaikeaa. Pistesyöpymisen alkamista ei huomata helposti, sillä se saattaa kestää kauan, tyypillisesti kuukausia. Usein syöpymä havaitaan vasta, kun se on tunkeutunut rakenteen, kuten ohutseinämäisen putken, läpi [19]. Pistekorroosio etenee kuitenkin harvoin massiivisten rakenteiden läpi. Normaalisti se pysähtyy, kun kuopat ovat saavuttaneet kriittisen syvyyden [18].

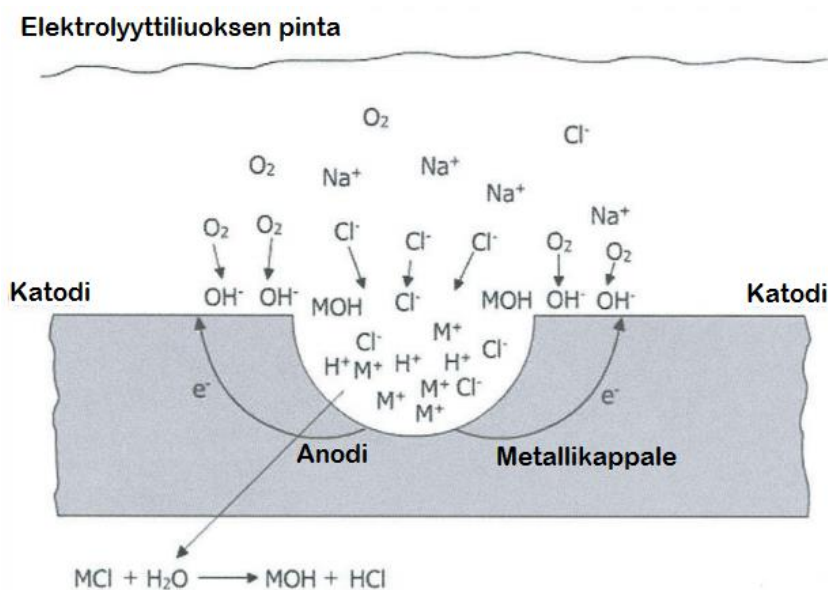
Pistekorroosio voi kuitenkin olla erityisen ongelmallinen ohutseinäisille putkistoille, sillä se johtaa reiän syntymiseen ja kuljetetun kaasun tai neste-  
n vuotamiseen. Vuotamisen myötä korroosiosta muodostuu ongelma, jolla on taloudellisia vaikutuksia, koska huk-

kaan menevää ainetta ei voida myydä tai se voi pilata vuotoympäristön tai aiheuttaa onnettomuusriskin. Kantavat rakenteet ovat putkistoihin verrattuna massiivisempia esimerkiksi seinämäpaksuudeltaan eikä pistekorroosio juurikaan vaikuta niiden kestävyYTEEN.

Pistekorroosiota esiintyy tyypillisesti metalleilla, joiden korroosionkesto perustuu suojaavaan passiivikerrokseen, kuten ruostumattomilla teräksillä tai alumiineilla [15; 18-20]. Syöymiseen vaikuttavat pinnalle muodostuneen suojakalvon stabiilisuus ja mahdollisuus uusiutua, vaikuttavan liuoksen, kuten meriveden, laatu sekä metallin koostumus [15]. Pistekorroosion riskiä lisäävät liuoksen hapettavuuden ja lämpötilan kasvu [20] ja liuoksen hidas virtausnopeus [15; 20]. Vastaavasti pistekorroosion vaara vähenee, kun liuoksen virtausnopeus tai emäksisyys kasvaa. Kun pH-arvo on yli 12, ei pistekorroosiota juurikaan esiinny [20].

Pistekorroosio voi alkaa esimerkiksi erilaisista pinnan heterogeenisuuksista, kuten pinnan karheusvaihteluista, tai pintakalvojen rakennevirheistä [18]. Myös liuoksen sisältämät aggressiiviset anionit, kuten kloridi-, bromidi-, hypokloriitti- tai tiosulfaatti-ionit, aiheuttavat pistesyöymää [15; 18; 19].

Useimmiten tätä korroosimuotoa ilmeneekin kloridi-ionien vaikutuksesta runsaasti happea sisältävässä ympäristössä, jossa kloridit rikkovat suojaavan passiivikalvon sen heikosta kohdasta [19; 20]. Tällainen tilanne on esitettyä kuvassa 3.



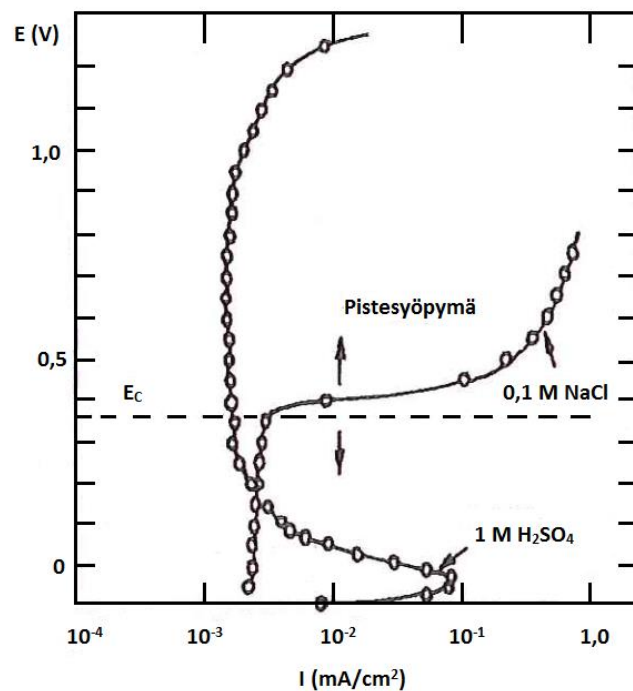
**Kuva 3.** Pistekorroosion periaate suolapitoisessa liuoksessa kuten merivedessä. *M* on metalli-ioni. Muokattu lähteestä [21].

Mitään kriittistä kloridipitoisuutta, jolloin pistekorroosiota esiintyisi, ei kuitenkaan voida esittää, sillä kloridi-ionien lisäksi tähän korroosioon vaikuttavat monet muut mainitut tekijät [15]. Kloridien aiheuttaman pistekorroosion alkaminen vaatii metallista ja liuoksen pH-arvosta riippuvan kriittisen elektrodipotentiaalin, niin sanotun pistesyöymäpotentiaalin, ylittämisen [18; 20].

Paikallisen passivaatiokerroksen tuhouduttua kloridi-ionien aiheuttama pistekorroosio etenee happipitoisessa liuoksessa niin, että syöpymäkohtaan kulkeutuu lisää kloridi-ioneja saaden aikaan pistemäisen anodin laajan passiivisen kerroksen keskelle, kuten kuvasta 3 ilmenee. Tällöin vallitsee epäedullinen anodin ja katodin välinen pinta-alasuhde, joka kiihdyttää korroosiota anodilla [19]. Positiivisten metalli-ionien syöpymäkohdasta liukenemisen vuoksi syntyy alueelle positiivinen varaus, jolloin negatiiviset kloridi-ionit pyrkivät sähköisen neutraalisuuden säilyttämiseksi siirtymään syöpymän alueelle. Nämä ionit muodostavat metalliklorideja. Metallionien väkevyys myötä vettä siirtyy syöpymiskohtaan ja vesi hajottaa syntyneet metallikloridit metallihydroksideiksi [18; 19]. Ne nousevat reiän pinnalle ja hapettuvat edelleen [19]. Syöpymiskohtaan muodostuu lisää aktiivisia kloridi- ja vetyioneja [18; 19]. Syöpymiskohdan pH-arvo laskee ja pistesyöpmisen nopeus kasvaa [19].

Kun pistekorroosion kuoppa on saavuttanut kriittisen syvyyden, se ei enää syvene, sillä siirtymismatkan kasvaessa tätä suuremmaksi tulee ionien siirtymisestä termodynaamisesti epäedullista. Sen sijaan anodinen kohta siirtyy ja pistemäinen kuoppa levenee kuoppakorroosioksi. Kuoppakorroosio jatkaa levenemistä ja ajan myötä korroosio muuttuu yleiseksi korroosioksi säilyttäen kuitenkin paikallisia syvempiä kuoppia [8; 22].

Pistekorroosioriskiä voidaan arvioida esimerkiksi polarisaatiokäyrien avulla. Tällöin määritetään pistesyöpmäpotentiaali, joka esiintyy käyrien passivaatioalueella ja jossa alkaa voimakas anodisen virran kasvu [18]. Tällainen polarisaatiokäyrä ruostumattomalle teräkselle on esitettyä kuvassa 4.



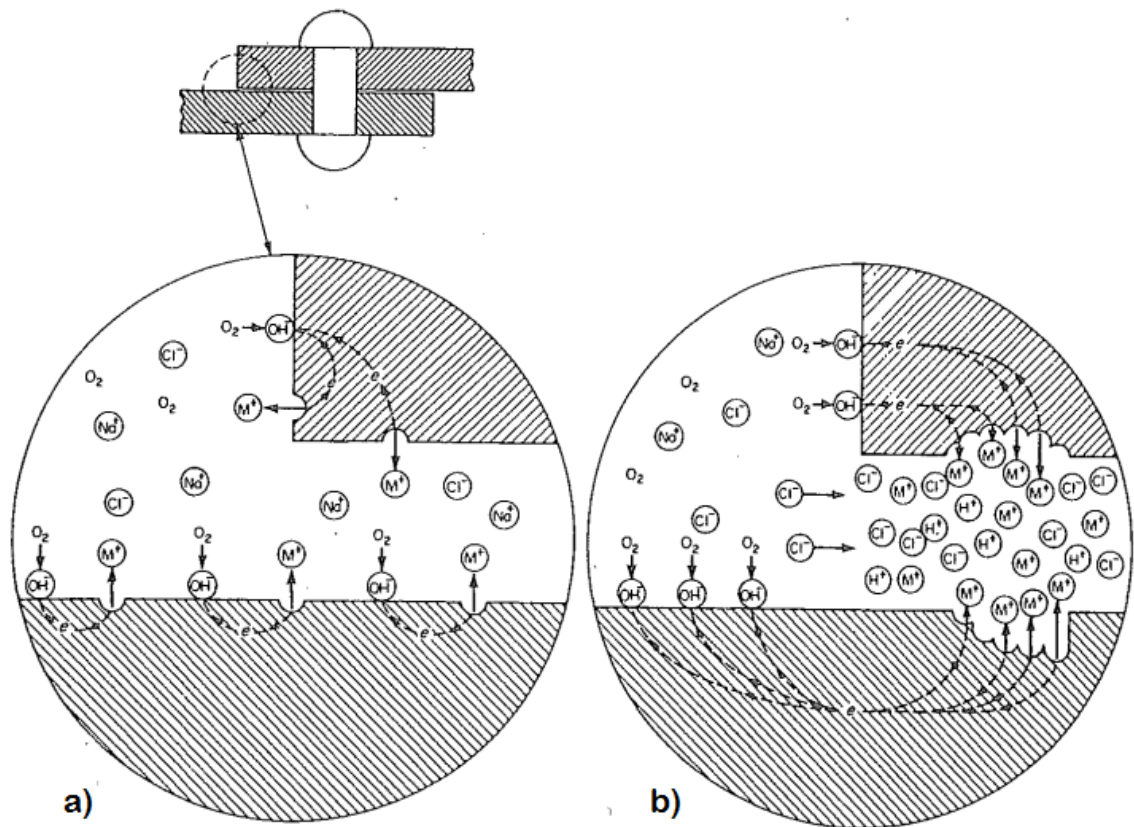
**Kuva 4.** Ruostumattoman teräksen polarisaatiokäyrät 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-liuoksessa ja 0,1 M NaCl-liuoksessa [18].

## 2.2.2 Rako- tai piilokorroosio

Rako- tai piilokorroosiolla tarkoitetaan paikallista metallin syöpymistä kahden pinnan välisessä ahtaassa raossa tai erilaisten kerrostumien, kuten valssihilseen, alla, kun sinne pääsee tunkeutumaan korroosion mahdollistava liuos, mutta jonne hapella on vain rajallinen pääsy [15; 18-20]. Mahdolliset pintoja suojaavat passiivikerrokset eivät tällöin pääse muodostumaan hapenpuutteen vuoksi [19].

Rakokorroosiota esiintyy erilaisten aggressiivisten liuosten, niin happamien kuin emäksistenkin, yhteydessä, mutta myös luonnonvedet voivat aiheuttaa rakokorroosiota [18]. Tällöin veden epäpuhtaudet pyrkivät kerrostumaan metallin pinnalle veden seisomisen tai vähäisen virtausnopeuden seurauksena. Näiden kerrostumien alle muodostuu happikatoa tai veden muiden komponenttien pitoisuudeltaan erilaisia alueita, mistä on seurauksena korroosioparin muodostuminen [15]. Happipitoisuuserot ovat yleisin syy tälle korroosioparille [18]. Väkevyyserosta johtuen happiköyhempi alue toimii anodina ja korroosiota ilmenee tällä alueella [15; 18]. Raon ulkopuolinen katodinen alue on lisäksi yleensä huomattavasti rakoa suurempi, jolloin epäedullinen pinta-alasuhde alueiden välillä lisää korroosion nopeutta anodilla [19].

Piilokorroosio esiintyy pistekorroosion tavoin usein kloridipitoisissa liuoksissa [18; 20], sillä kloridi-ionit aktivoivat ja voimistavat syöpymistä [15] ja reaktiomekanismi on tällöin samanlainen kuin pistekorroosiossa [18]. Tällainen tilanne on esitettyä myös kuvassa 5. Raossa korroosiossa syntyneet positiivisesti varautuneet metalli-ionit muodostavat rakoon negatiivisia kloridi-ioneja puoleensa vetävän sähkökentän. Metallionien väkevyyserosta syntynyt osmoosi tuo vettä rakoon, vesi hajottaa syntyneet metallikloridit metallihydroksideiksi ja aktiivisiksi vety- ja kloridi-ioneiksi, kuten kuvasta 5 ilmenee. Raossa olevan vesiliuoksen pH-arvo metallin pinnalla laskee ja metallin syöpyminen nopeutuu [19].



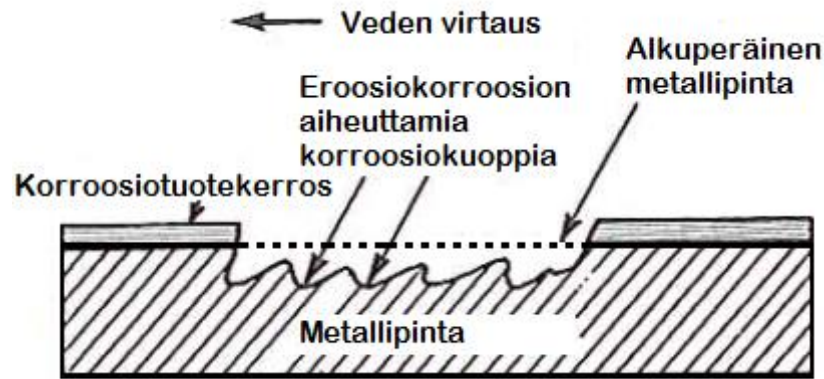
**Kuva 5.** Rakokorroosion kehittyminen: a) alkutilanne b) myöhempi vaihe [23]. Kuvassa  $M^+$  on metalli-ioni.

### 2.2.3 Muut korroosion esiintymismuodot

Vesiympäristöissä veden virtausnopeudella on usein myös merkitystä korroosion kannalta. Se vaikuttaa suoraan kahteen seuraavaksi esiteltävään korroosion muotoon: eroosiokorroosioon ja kavitaatiokorroosioon. Nämä korroosionmuodot eivät ole maahan tehtävän paalutuksen kannalta yleensä merkittäviä, sillä maaperässä vesi liikkuu normaalisti suhteellisen hitaasti. Ne ovat kuitenkin merkittäviä vesiympäristöissä ja esitellään tämän vuoksi.

Eroosiokorroosiolla tarkoitetaan rakenneaineen sähkökemiallista syöpymistä, jota kiihdyttävät passiivikalvon ja suojaavan korroosiotuotekerroksen jatkuva irtoaminen suuren virtausnopeuden sekä mahdollisten kuluttavien aineiden vaikutuksesta [18; 19]. Tämä ilmiö on esitettyä kuvassa 6. Puhtaan nesteen aiheuttamassa eroosiokorroosiossa korroosionopeus riippuu virtausnopeudesta [18].





**Kuva 6.** Eroosikorroosion periaate, muokattu lähteestä [23].

Tämän korroosionmuodon esiintymiseen vaikuttaa myös virtauksen pyörteisyys, jota esiintyy virtauksen epäjatkuvuuskohdissa ja joka voi johtaa kriittisen nopeuden ylittymiseen [18; 19]. Kriittisen virtausnopeuden ylittyttyä eroosikorroosion määrä kasvaa voimakkaasti useilla metalleilla [15]. Eroosikorroosion kriittinen virtausnopeus on tapauskohtainen riippuen ympäristöstä ja altistuvasta materiaalista [18]. Kriittinen virtausnopeus voi hitaimmillaan olla 0,6-0,9 m/s, mutta esimerkiksi titaanilla kriittinen virtausnopeus on tyypillisesti yli 27 m/s [24].

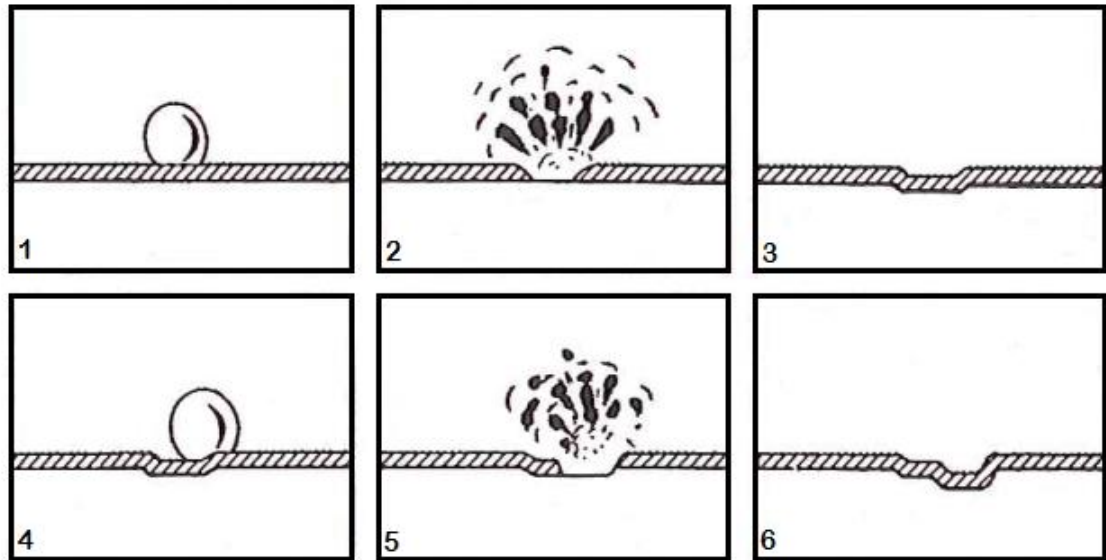
Tätä korroosiota edistävät veden syövyttävyyys, lämpötila ja ne tekijät, jotka vaurioittavat metallin pintaa suojaavaa passiivikerrosta, kuten kloridi-ionit [15; 19]. Myös veden pH-arvo ja veteen liuenneen hapen pitoisuus voivat vaikuttaa eroosikorroosioon esiintymiseen [25].

Virtauksen mukana kulkeutuvat kiintoainehiukkaset lisäävät virtauksen kuluttavaa vaikutusta aiheuttamalla niin sanottua partikkelieroosiota. Nämä partikkelit voivat rikkoa korroosiosuojakerrokset metallin pinnalta jo kriittistä virtausnopeutta pienemmillä partikkelinopeuksilla. Suurilla nopeuksilla partikkelieroosio aiheuttaa yleensä metallipinnan mekaanista kulumista, jolloin materiaalin korroosionkestävyys menettää merkityksensä [18].

Meriolosuhteissa liikkuva jää aiheuttaa merkittävän osa betonirakenteisiin kohdistuvasta eroosiosta. Eroosioaurioita syntyy, kun jää törmää rakenteeseen, mitä seuraa jään toistuva hankautuminen törmättyä pintaa vasten törmäyksen jälkeen. Vastaavasti jää irrottaa korroosiotuotteet teräksen pinnasta ja jään mukana kulkeutuvat sedimentit kiihdyttävät teräksen vaurioitumista entisestään [26].

Kavitaatiokorroosiossa materiaali vaurioituu, kun nestevirtaukseen syntyneet kaasukuplat luhistuvat räjähdysmäisesti metallikappaleen pinnalla ja syntyy voimakkaita paineaaltoja ja voimakasta paikallista kuumenemistä [18; 19]. Paineaaltojen mekaaninen voima on niin suuri, että toistuvat kuplien kokoon luhistumiset rikkovat metallin pintaa suoja-

van passivaatiokalvon tai muun korroosiotuotekerroksen ja uutta metallia paljastuu alttiiksi korroosiolle [15; 18; 19]. Tämä toimintamekanismi on esitetty kuvassa 7. Pahimmillaan suuret paineiskut voivat jopa vaurioittaa korroosiotuotekerroksen alla olevaa metallia, jolloin kyse on kavitaatioeroosiosta, ja korroosio pystyy paikallisesti etenemään nopeasti [18; 19].



**Kuva 7.** Kavitaatiokorroosion etenemisen periaate [23].

Kavitaatiokorroosiota esiintyy hydraulilaitteissa, laivojen potkureissa, pumppujen siipipyörissä, putkistoissa sekä laitteissa, joissa nesteen virtausnopeus on suuri ja joissa esiintyy paineen vaihteluja [18]. Kavitaatiokaasukuplia muodostuu alueille, joissa paine paikallisesti laskee alle nesteen höyrynpaineen [18; 19], ja kuplat luhistuvat, kun nestepaine nousee uudelleen [18]. Kuplien muodostumiseen voi vaikuttaa esimerkiksi virtauksen epäsäännöllisyys, nesteen pyörteinen liike, nestevirran epäjatkuvuuskohdat, virtausta ohjaavilla pinnoilla esiintyvä värähtely tai nesteen virtausnopeuden kasvu [19].

### 3. MAAPERÄKORROOSIO

Maaperässä korroosiota esiintyy, kun sähkökemialliset edellytykset täyttyvät eli korroosiopari muodostuu. Elektrolyytinä toimii maassa esiintyvä vesi. Sähköpari muodostuu joko galvaanisesti kahden eri metallin, kuten kupariputken ja teräsrakenteen, välille tai saman metallin eri osien välille, jos vallitsevassa ympäristössä on väkevyyseroja esimerkiksi hapen suhteen.

Maaperässä korroosio on joko yleistä tai paikallista. Syöpyminen maassa riippuu altistumisajasta ja korroosiovirran suuruudesta, johon vaikuttavat ympäristön ominaisuudet.

#### 3.1 Yleinen korroosio

Yleisellä korroosiolla tarkoitetaan syövyttävässä ympäristössä lähes tasaisella nopeudella tapahtuvaa metallipinnan sähkökemiallista liukenemista, jossa mikään pinnan osa-alue ei ole pysyvä anodi tai katodi, vaan anodiset ja katodiset alueet vaihtavat sijaintiaan koko ajan [15; 18; 19]. Tämä korroosimuoto on tyypillinen suojaamattomille metallipinnoille tavallisessa ilmastorasituksessa sekä kemiallisesti vaikuttavien aineiden kuten happojen, emästen, happoisten kaasujen kuin neutraalien vesiliuosten läsnä ollessa [18; 19]. Tällaiset olosuhteet vallitsevat myös homogeenisessä maaperässä, joka on yleensä kostea. Joskin maassa olevat rakenteet altistuvat useammin paikalliselle korroosiolle kuin yleiselle korroosiolle. Yleisen korroosion seurauksena muodostuva korroosiotuote voi olla joko hyvin suojaava, eli vaikeasti kuluva ja liukeneva suojakerros, tai helposti vaikuttavaan ympäristöön liukeneva [19].

Yleinen korroosio vaikuttaa, kun maahan haudatun rakenteen pinnalla tai sitä ympäröivässä maatyössä ei ole poikkeavuuksia ja syöpyminen tapahtuu yhtenäisesti koko rakenteen pinnalla korroosiokennojen polarisoitumiseen asti [27]. Suhteellisen tasaista syöpymistä tapahtuu suuressa osassa maanalaisen metallikappaleen pintaa lähinnä karkearakeisessa maassa, jossa hapen läpäisykyky on suuri [28]. Tämän korroosimuodon vaikutuksesta vaurioituminen tapahtuu yleensä vasta pitkien altistumisaikojen jälkeen [15] ja syöpymisen seuraaminen on yleensä helppoa painohäviö- tai seinämäpaksuusmittausten avulla [18].

#### 3.2 Paikallinen korroosio

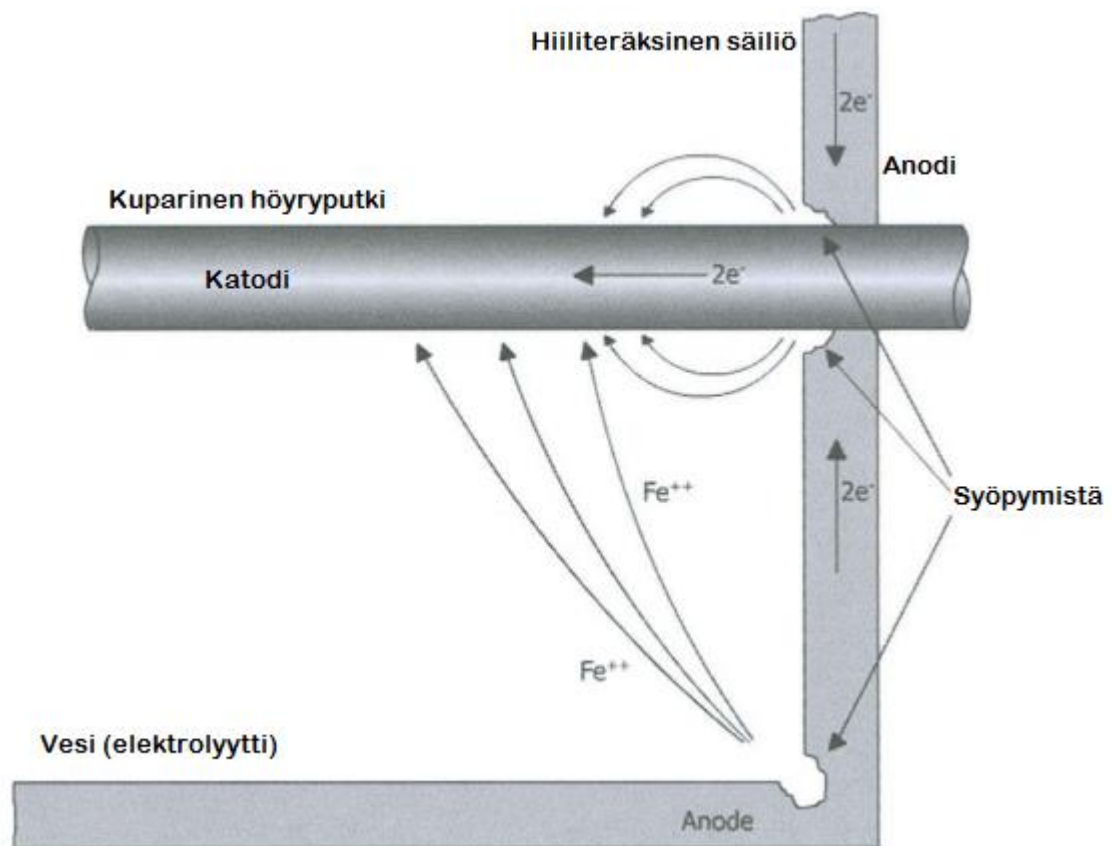
Metallinen paikallinen syöpyminen maaperässä on usein galvaanista tai väkevyyseroista johtuvaa korroosiota, mutta voi aiheutua myös mikrobiologista syistä tai hajavirroista johtuen. Hajavirtojen aiheuttama korroosioriski sivuutetaan tässä työssä, sillä niiden merkitys työn kokeellisessa osuudessa käsiteltävällä alueella on vähäinen, koska alueella ei

ole esimerkiksi sähköistä raideliikennettä. Mikrobiologisia syitä ja niiden vaikutusta käsitellään erikseen maaperäkorroosioon vaikuttavien tekijöiden yhteydessä.

Paikallista korroosiota esiintyy, kun maahan asennetun rakenteen pinnalla tai sitä välittömästi ympäröivässä maatyössä esiintyy paikallisia eroja. Paikallinen korrosio keskittyy pienelle alueelle rakenteen kokonaispinnasta eikä ole välttämättä yhtenäistä. Korroosionopeus voi olla suurta, kunnes korrosio on läpäissyt koko rakenteen. Yleisesti ottaen maassa olevat rakenteet altistuvat useammin paikalliselle korroosiolle kuin yleiselle korroosiolle [27].

### 3.2.1 Galvaaninen korrosio

Galvaanisella korroosiolle tarkoitetaan nopeutunutta syöpymistä, jota esiintyy, kun kaksi erilaista metallia tai metalliseosta on sähköisessä kontaktissa toisiinsa sähköä johtavassa väliaineessa [18-20]. Sähköä johtava yhteys voi olla suora kosketus tai tapahtua johtimen välityksellä [20]. Tällöin muodostuu galvaaninen sähköpari ja epäjalompi eli alhaisemman elektrodipotentiaalin omaava metalli toimii anodina ja syöpyy. Tämä syöpyminen on nopeampaa kuin samalla metallilla yksinään kyseessä olevassa ympäristössä. Kuparin ja teräksen muodostaman galvaanisen parin periaate on esitettyä kuvassa 8.



**Kuva 8.** Galvaanisen korroosion periaate kupariputken ja terässäiliön välillä, muokattu lähteestä [29].

Kuvassa 8 terässäiliö on sähköisesti epäjalompi ja syöpyy. Kuvassa 8 kupari on korkeamman elektrodipotentiaalin omaava eli jalompi metalli ja se toimii katodina. Galvaanisen parin katodina sen syöpyminen päinvastoin vähenee tai pysähtyy lähes täysin [18-20]. Galvaaninen korroosiopari voi muodostua myös, kun metalli on kosketuksissa jalomman ei-metallisen sähköä johtavan materiaalin, kuten esimerkiksi grafiitin, kanssa [18].

Galvaanisen korroosion ajava voima on metallien välinen sähkömotorinen voima, potentiaaliero, joka määrittää osittain syöpymisen nopeuden. Puhtaiden metallien potentiaaliero voidaan teoreettisesti arvioida metallien standardipotentiaalisarjasta, mutta näitä teoreettisia tasapainotiloja esiintyy kuitenkin harvoin käytännön tilanteissa. Tällöin on otettava mukaan myös metalliseokset ja metallien passiivi- ja aktiivitilat [19], jolloin saadaan käytännön olosuhteissa määritellyt potentiaalisarjat [18]. Näissä jännitesarjoissa metallit on asetettu jaloutensa mukaan järjestykseen vallitsevissa olosuhteissa ja mitä kauempana galvaanisen parin metallit ovat toisistaan tässä sarjassa, sitä todennäköisempää on sähköisen parin muodostuminen ja korroosio [18; 20]. Korroosionopeus ei kuitenkaan ole suoraan sidottu tähän potentiaalieroon vaan hapetuspelkistysreaktioiden kineetiikkaan metalliparin pinnoilla [18].

Korroosionopeuteen galvaanisessa korroosiossa vaikuttavat myös elektrolyytin sähkönjohtavuus ja syövyttävyyssyöpyvään metalliin nähden sekä epäjalomman metallin pinta-alan suuruus suhteessa jalomman metallin pinta-alaan [18-20]. Kun elektrolyytin sähkönjohtavuus on riittävän suuri, kuten merivesissä, epäjalompi metalli syöpyy tasaisemmin koko pinta-alaltaan. Vastaavasti pieni sähkönjohtavuus johtaa korroosion keskittymiseen metallien rajapinnan läheisyyteen [18].

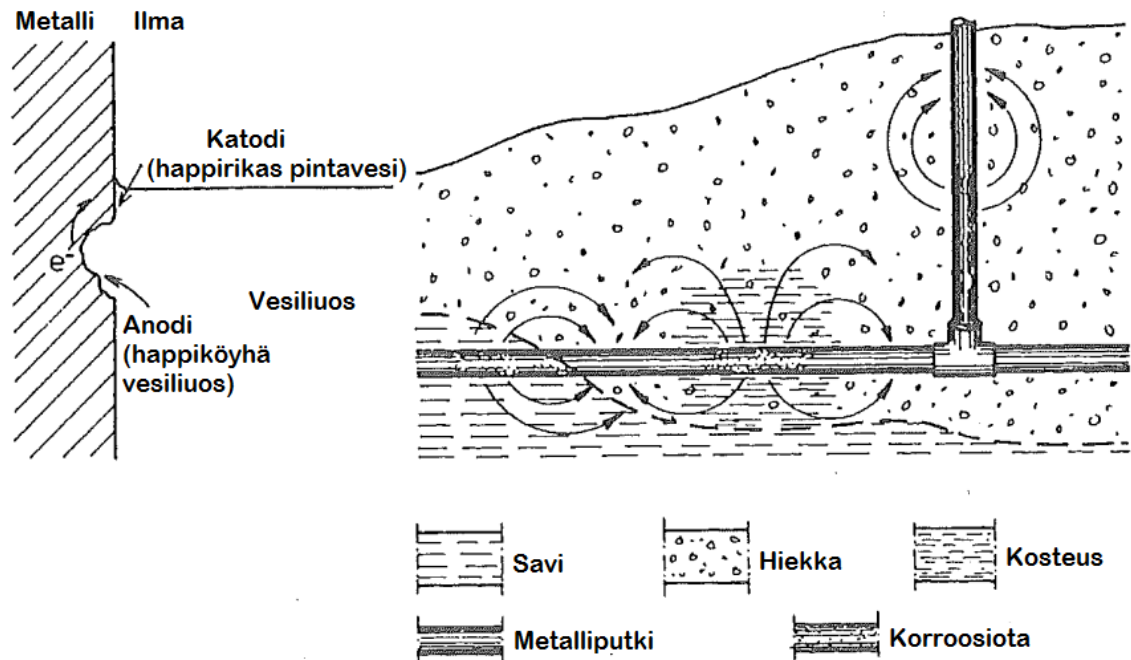
Korroosionopeus kasvaa, kun epäjalomman metallin pinta-alan pienentyy suhteessa jalomman metallin pinta-alaan. Tämän vuoksi esimerkiksi hitsaus- tai liittiliitoksissa on vältettävä tilannetta, jossa liitosmateriaali on epäjalompi verrattuna liitettäviin materiaaleihin [18; 20].

Korroosionestossa käytetään galvaanista paria hyödyksi niin sanotussa katodisessa suojauksessa. Siinä suojattava metalli kytketään sähköisesti epäjalompaan uhrimetalliin tai pinnoitetaan metalli epäjalommalla metallilla. Esimerkiksi terästä suojataan sinkkipinnoitteella ilmastollisessa rasituksessa [18].

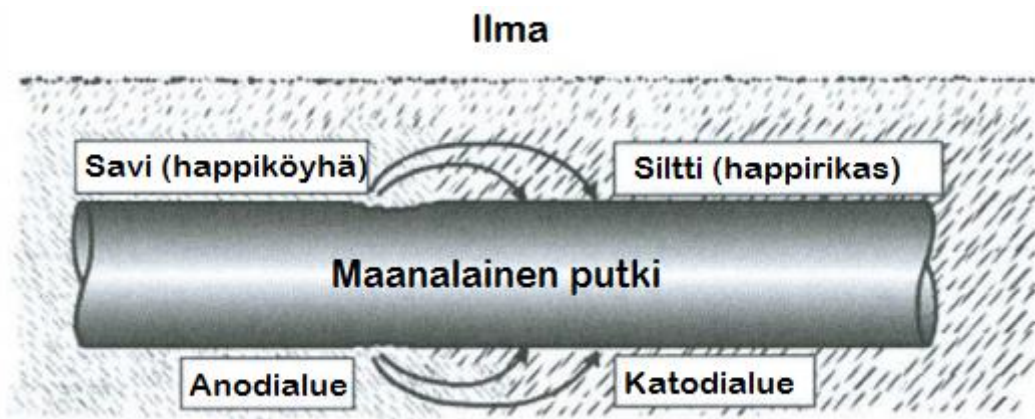
### 3.2.2 Väkevyyskorroosio

Väkevyyskorroosion mekanismi on edellä kuvaillun galvaanisen parin muodostuminen, kun elektrolyytissä on väkevyseroja. Tavallisimmin tämä korroosionmuoto johtuu hapen väkevyserosta elektrolyyttiliuoksessa. Tällöin anodiksi muodostuu se osa metallin pintaa, joka on kosketuksessa vähähappiseen elektrolyyttiin, kun katodisella osalla happea on saatavilla paljon [19], kuten kuvissa 9 ja 10 on esitetty. Maaperässä katodinen

alue voi muodostua metallipinnan osalle, joka on hapen läpäisykyvyltään hyvässä maassa. Olosuhteet väkevyyskorroosiolle voivat syntyä esimerkiksi, kun osa metallikappaleesta on savessa ja osa hiekassa tai siltissä [28], mikä ilmenee myös kuvista 9 ja 10.



**Kuva 9.** Väkevyyskorroosion periaate vedessä ja maaperässä [19].



**Kuva 10.** Väkevyyskorroosion vaikutus maanalaiseen putkeen, muokattu lähteestä [11].

Korroosiota voi ilmetä myös elektrolyyttien liuenneiden metalli-ionien väkevyyseron vuoksi. Väkevyys lisäksi väkevyyserojen vaihtelu voi aiheuttaa korroosiota [19].

### 3.3 Maaperäkorroosioon vaikuttavat tekijät

Maaperäkorroosioon vaikuttaviin tekijöihin kuuluvat maaperän ja siinä esiintyvän veden kemialliset, sähköiset ja mikrobiologiset ominaisuudet. Sähkökemiallisen luonteensa vuoksi korroosio maaperässä on riippuvainen elektrolyytin läsnäolosta. Useimmissa tapauksissa maaperän kosteus onkin suoraan verrannollinen korroosionopeuksiin [27]. Kosteus vaikuttaa myös muihin korroosiotekijöihin kuten ominaisvastukseen ja happipitoisuuteen. Maaperän vesipitoisuuden merkitystä ei käsitellä erikseen, sillä sen vaikutus esitellään muiden vaikuttavien tekijöiden kautta. Maan vesipitoisuus määritellään Euroopassa maassa olevan veden massan ja kuivan maa-aineksen massan suhteena [30; 31], kun taas Amerikassa käytetään yleensä veden tilavuusosuutta.

Kirjallisuudessa nimetään yhdeksi maaperäkorroosioon vaikuttavaksi tekijäksi alueen infrastruktuurin tasavirtalähteistä peräisin olevat hajavirrat. Ne ovat olleet aikanaan merkittävä syy esimerkiksi amerikkalaisen National Institute of Standards and Technology -viraston tutkimusten aloittamiselle 1900-luvun alussa [32]. Tässä työssä ne kuitenkin sivuutetaan niiden alueellisesti vähäisemmän merkityksen vuoksi. Mainittakoon kuitenkin, että tasavirtalähteiden maadoituksen läheisyys lisää korroosioriskin suuruutta.

#### 3.3.1 Maalajit ja maaperän koostumus

Standardin SFS-EN ISO 14688-1 mukaan eri maa-ainekset jaotellaan niiden raekoon mukaan hyvin karkeaksi, karkeaksi ja hienoksi maaksi. Hyvin karkea maa sisältää raekooltaan yli 63 mm kivet ja lohkareet. Maalajien raekoot ovat määräytyneet maan rakeisuuden määrittämisessä käytettyjen seulasarjojen seulojen silmäkokojen perusteella. Esimerkiksi karkean soran lajite läpäisee silmäkooltaan 64 mm seulakoon, mutta jää silmäkooltaan 20 mm seulalle.

Karkea ja hieno maa sisältävät alle 63 mm maa-ainekset, joita ovat sorat, hiekat, siltit ja savet. Sora, hiekka ja siltti jaetaan vielä tarkemmiksi luokituksiksi lisämääreillä karkea, keski ja hieno. Tämä jako on esitettyä taulukossa 2.

**Taulukko 2.** Maalajitteiden jako niiden koon perusteella [33].

Maalajitteet	Alalajitteet	Lisämääreet	Raekoot (mm)
Karkea maa	Sora (Gr)	Karkea sora (CGr)	20-63
		Keskisora (MGr)	6,3-20
		Hienosora (FGr)	2,0-6,3
	Hiekka (Sa)	Karkea hiekka (CSa)	0,63-2,0
		Keskihiekka (MSa)	0,2-0,63
		Hieno hiekka (FSa)	0,063-0,2
Hieno maa	Siltti (Si)	Karkea siltti (CSi)	0,02-0,063
		Keskisiltti (MSi)	0,0063-0,02
		Hieno siltti (FSi)	0,002-0,0063
	Savi (Cl)	-	< 0,002

Taulukossa 2 on esitetty suluissa kansainvälisen standardin englanninkieliset tunnukset, joiden lisäksi yleisessä käytössä ovat myös vastaavat suomenkieliset tunnukset.

Useimmat maat ovat sekarakeisia ja sisältävät päälajitteen ja toissijaisia lajitteita. Ne merkitään substantiivilla (päänimike), joka kuvaa päälajitetta ja yhdellä tai useammalla adjektiivilla (täydentävillä nimikkeillä), joka kuvaa toissijaisia lajitteita. Päälajike kirjoitetaan lyhenteessä suurella alkukirjaimella (esim. hiekkainen sora saGr) [33].

Suomessa on laajemmassa käytössä ISO-standardin sijaan Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen kaivuluokitustutkimuksen yhteydessä vuonna 1971 kehittämä ja vuonna 1974 käyttöön otettu geotekninen maalajiluokitus eli GEO-luokitus. Tämä luokitus on luotu palvelemaan rakennustekniikkaa Suomen olosuhteissa ja perustuu ensisijaisesti maalajien geologiseen syntytapaan [31; 34]. Taulukoissa 3-5 esitetään tämän luokituksen keskeisimmät jaot.

**Taulukko 3.** Geoteknisen maalajiluokituksen maalajiryhmät [34].

Maalajiryhmä	Lyhennys	Ominaisuudet
Eloperäiset maalajit	E	Maalaji koostuu pääasiallisesti eloperäisestä aineksesta tai sisältää eloperäistä ainesta > 20 paino-%
Hienorakenteiset maalajit	H	Lajittuneet hienorakeiset maalajit Hienoainespitoisuus ( $\leq 0,06$ mm) $\geq 50$ % Humuspitoisuus $\leq 20$ paino-%
Karkearakenteiset maalajit	K	Lajittuneet karkearakeiset maalajit Hienoainespitoisuus < 50 %
Moreenimaalajit	M	Lajittumattomat, useita eri lajitteita sisältävät maalajit

Taulukossa 3 esitetyillä lajittuneilla maalajeilla tarkoitetaan lähinnä veden huuhtelemia ja lajittelemia maalajeja, joissa on yleensä vallitsevana yksi tai korkeintaan kaksi päälajitetta. Vastaavasti lajittumattomissa maalajeissa esiintyy useita eri lajitteita eikä niissä mikään lajite ole selvästi yksinään vallitseva [34].

Taulukossa 4 esitetyt geoteknisen maalajiluokituksen kivennäismaalajien lajitteet vastaavat raekooltaan ja nimityksiltään melko pitkälle ISO-standardin mukaista jakoa. Alalajitteiden nimiä ei yleensä kuitenkaan käytetä maalajien niminä. Kivennäismaalajit sisältävät humusta eli eloperäistä ainesta  $\leq 20$  paino-% kivennäisaineksen painosta lasketuna. Savi- ja siltilajitteista käytetään yhteistä nimitystä hienoaines (Hi) [34].

Myös GEO-luokituksessa toissijaisen lajitteen mukaan voidaan antaa lisämääre päälajitteelle, jos toissijaisen lajitteen, soran, hiekan tai siltin, pitoisuus on 30-50 %. Tällaisia ovat esimerkiksi hiekkainen siltti (hkSi) tai sorainen hiekka (srHk). Näitä lisämääreitä käytetään myös taulukossa 5 esitetyille moreenimaalajeille, jos siltti-, hiekka- tai sorapitoisuus ylittää 30 % [34].



**Taulukko 4.** Geoteknisen maalajiluokituksen kivennäismaalajien lajitteet [34].

Päälajite		Alalajite	Rakeiden läpimitta (mm)
Nimi	Lyhennys		
Savi	Sa		≤ 0,002
Siltti	Si	Hienosiltti	> 0,002-0,006
		Keskisiltti	> 0,006-0,02
		Karkeasiltti	> 0,02-0,06
Hiekka	Hk	Hienohiekka	> 0,06-0,2
		Keskihiiekka	> 0,2-0,6
		Karkeahiekka	> 0,6-2,0
Sora	Sr	Hienosora	> 2,0-6,0
		Keskisora	> 6,0-20,0
		Karkeasora	> 20,0-60,0
Kivet	Ki	Pienet kivet	> 60-200
		Suuret kivet	> 200-600
Lohkareet	Lo		> 600

**Taulukko 5.** Geoteknisen maalajiluokituksen maalajit [34].

Maalajiryhmä	Maalaji	Lyhennys	Lajitepitoisuus (paino-%)			Raekoko d <sub>50</sub> (mm)
			Savi	Hienoaines	Sora	
Eloperäiset maalajit	Turve	Tv				
	Lieju	Lj				
Hienorakeiset maalajit	Savi	Sa	≥ 30			
	Siltti	Si	< 30	≥ 50	< 5	≤ 0,06
Karkearakeiset maalajit	Hiekka	Hk		< 50	≤ 50	> 0,06-2
	Sora	Sr		< 5	> 50	> 2-60
Moreeni-maalajit	Siltti-moreeni	SiMr		≥ 50	≥ 5	≤ 0,06
	Hiekka-moreeni	HkMr		5-50	5-50	> 0,06-2
	Sora-moreeni	SrMr		≥ 5	> 50	> 2

Taulukossa 5 esitetyn maalajin määrittää sen humuspitoisuus ja lajitepitoisuus. Kivennäismaalajit savea lukuun ottamatta nimetään d<sub>50</sub>-menetelmällä eli maalajite nimetään sen päälajitteen mukaan, johon 50 % seulan läpäisystä aineksesta kuuluu. Savet nimitetään savilajitteen määrän perusteella [34].

Moreenilla tarkoitetaan jäätikön toimintojen tuloksena syntyneitä lajittumatonta maalajia, joka sisältää toisiinsa sekoittuneena useita eri lajitteita siltistä soraan sekä tavallisesti myös kiviä ja lohkaraita. Syntyvaltaan moreenia oleva maalaji voidaan yleensä erottaa muista maalajeista silmämääräisesti, mutta joissain poikkeustapauksissa lajitepitoisuuden perusteella moreeniksi määritelty maalaji ei ole syntyvaltaan moreenia [34].

Turve on muodostunut maatumisasteeltaan vaihtelevista kasvien kasviryhmien jätteistä. GEO-luokitus mahdollistaa myös turpeiden tarkemman jaon maatuneisuuden ja puisuuden mukaan [34].

Liejun humuspitoisuus on yli 6 %, mutta sen pääaineeksena on mineraaliaines, jonka lajitepitoisuuden perusteella lieju nimetään silloin, kun humuspitoisuus on 6-20 % (savinen lieju, silttinen lieju). Jos humuspitoisuus on yli 20 paino-%, niin maalajin nimi on lieju [34-36].

GEO-luokituksessa esitetään maalajien jakoa myös muiden kuin edellä mainittujen ominaisuuksien mukaan. Näitä ovat esimerkiksi rakeiden pyöristyneisyys ja muoto, maalajien rakenteellinen tiiviys ja maalajien routivuus [34].

Maalajit voidaan ryhmitellä myös perustuen maan lujuuden muodostavaan ominaisuuteen. Tällöin maalajit jaetaan kitka- ja koheesiomaalajeihin. Kitkamaalajeilla lujuus muodostuu pääasiassa maarakeiden välisestä kitkasta ja näitä ovat karkearakeiset maalajit eli sora ja hiekka sekä moreenimaalajit. Koheesiomaalajien lujuus perustuu koheesioon eli maarakeiden kiinnevoimaan. Koheesiomaaleja ovat hienorakeiset maalajit savi ja siltti ja eloperäiset maalajit turve ja lieju [37].

Maaperän koostumuksen määrittää kuvailtujen maalajitteiden osuus tutkittavalla alueella. Savella on taipumusta rajoittaa ilman ja veden liikettä eniten, koska sillä on hienoin rae-  
koko ja pieni huokoskoko rakeiden välillä. Pieni huokoskoko on syynä pieneen vedenjohtavuuteen. Hiekalla ja soralla on suuremmat raekoot ja siten parempi ilmastus ja kosteuden jakautuminen. Maaperän koostumus vaikuttaakin siten esimerkiksi liukoisten suolojen ja kaasujen diffuusionopeuteen [38].

Maan vedenjohtavuus on maaperän ominaisuus, joka liittyy sen koostumukseen ja kuvaa maaperän kykyä pitää vettä sisässään. Tähän ominaisuuteen vaikuttaa myös pohjaveden korkeus. Jos pohjavesi on korkealla ja pitää maaperän jatkuvasti kosteana, voi myös hyvin kosteutta läpäisevä maa olla vedenjohtavuudeltaan heikko [38].

Vesipitoisuus ja huokosveden koostumus määrittävätkin maaperän mahdollisuuden toimia elektrolyytinä. Yleensä voidaan lähteä siitä perusoletuksesta, että maassa oleva vesi kykenee sähkönjohtavuutensa perusteella aina toimimaan riittävänä elektrolyytinä. Vain hyvin kuivassa karkearakeisessa maassa sähkönjohtavuus laskee niin alas, että se vaikuttaa korroosiota ehkäisevästi.

Korroosion määrää säätelee tavanomaisissa maaperäolosuhteissa enemmän hapen saatavuus ja sen eroista johtuvat happipitoisuuserot eri maakerroksissa. Vaikka hienorakeiset maalajit, kuten savet ja siltit läpäisevät vettä karkearakenteisia maalajeja heikommin ja pysyvät siten helpommin kosteina, hapen saatavuus on näissä maalajeissa, erityisesti savissa, pieni, mikä vähentää aerobisen korroosion riskiä.

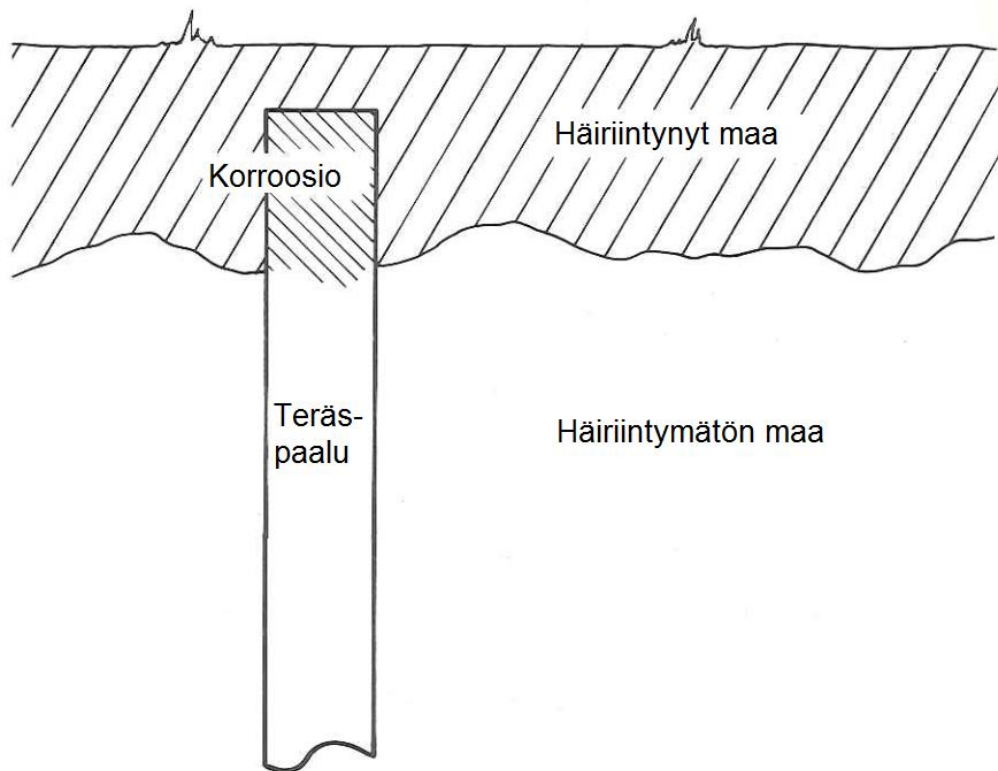
### 3.3.2 Happipitoisuus

Väkevyyseropari on usein hapen väkevyyseroista johtuva ilmiö, jossa paikallinen korrosio kohdistuu vähemmän ilmaa saavalle alueelle. Tällaisen parin toimintaan vaikuttavat pH, ympäristön luonne, sähkönjohtavuus, anodireaktio sekä katodisen alueen suuruuden suhde anodisen alueen suuruuteen. Hapen diffuusiota pidetään kuitenkin merkittävimpänä tekijänä ja mitä suurempi hapen konsentraatio on katodisella alueella, sitä suurempi on korroosioparissa esiintyvä virta [39].

Häiriintyneellä maakerroksella tarkoitetaan ihmisen muokkaamaa maata ja häiriintymättömällä maalla luonnontilaista maaperää. Hapen merkitys häiriintymättömässä maassa on merkittävämpi kuin esimerkiksi ominaisvastuksen tai pH:n. Hapen diffuusio häiriintymättömässä maassa ja erityisesti pohjaveden pinnan alla on niin hidasta, että happikorrosioprosessi hidastuu merkittävästi.

Jos teräspaalu asennetaan häiriintymättömään maahan ja sitten tehdään täyttökerros paalun ympärille, häiriintyneessä täytössä oleva osuus paalusta toimii katodisena häiriintymättömässä maassa olevalle osalle. Tällöin korrosio on voimakkainta siinä osassa paalua, joka on täyttökerroksessa, kuten kuvassa 11 on esitetty [38].

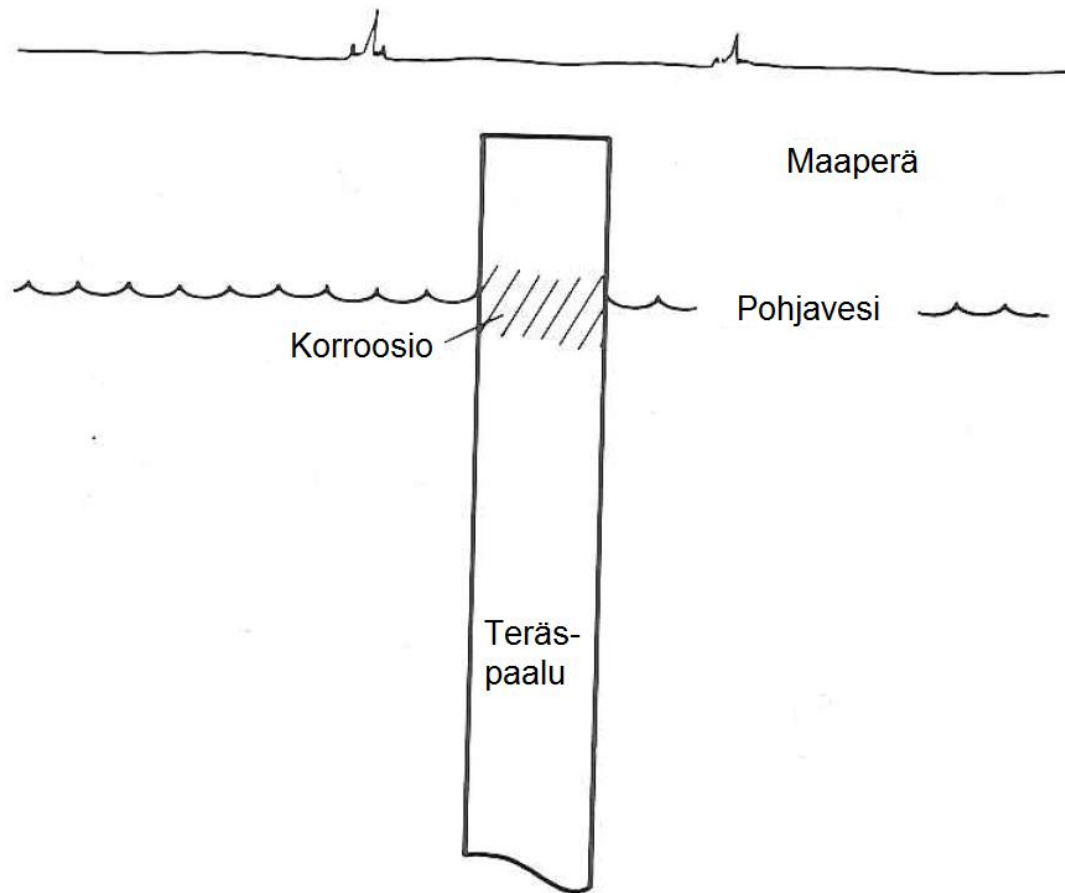
Tämän anodi-katodi-systeemin voimakkuus riippuu häiriintyneen ja häiriintymättömän kerroksen happierosta, joka kasvattaa potentiaaliero näiden välillä. Maaperän ominaisvastus määrittää sen, kuinka suurella etäisyydellä tämä systeemi vaikuttaa. Matalan ominaisvastuksen maaperässä anodinen pinta-alue on suurempi ja korrosio on luonteeltaan yleistä, kun taas korkean ominaisvastuksen maaperässä korrosio on usein paikallista [38].



**Kuva 11.** Häiriintyneen ja häiriintymättömän maan happierosta johtuvan korroosion sijainti teräspaalussa, muokattu lähteestä [38].

Vastaavasti jos paalu on häiriintymättömässä maassa, jossa pohjavesi on korkealla, korroosiota voi esiintyä vedenpinnan tasolla. Tällainen tilanne on esitettyä kuvassa 12. Seurausena oleva korroosio ei ole välttämättä suurta, mutta se voi olla merkittävämpää, jos pohjaveden taso ja siten hapen saatavuus vaihtelee. Tässä tapauksessa vedenpinnan yläpuolinen osuus paalusta toimii katodina ja alapuolinen osuus anodina [38].

Kahden eri maa-aineksen rajalla paikallinen väkevyyseron aikaansaama kennoreaktio voi olla voimakas aiheuttaen kaksi tai kolme kertaa suuremman korroosionopeuden kuin mitä aiheutuisi kummassakaan maa-aineksessa yksinään. Tällaisessa tilanteessa tulisi käyttää puhdasta, karkearakeista kitkamaata, jotta maaperän luontainen ominaisvastus olisi matalampi sen kuivuessa ja hapen läpäisykyky olisi parempi vähentäen happikonsentraatiokennojen muodostamista [40]. Kitkamaalajit on määritelty luvussa 3.3.1.



**Kuva 12.** Pohjaveden sijainnin vaikutus happierosta johtuvaan korroosioon, muokattu lähteestä [38].

### 3.3.3 Ominaisvastus

Maaperäkorroosiotutkimuksissa käytettävä ominaisvastus on suhteellisen helposti mitattava suure, sillä se on sähkönjohtavuuden käänteisluku. Se kuvaa ympäristön kykyä kuljettaa korroosiovirtaa [40; 41] eli sitä, kuinka hyvin maaperä toimii elektrolyytinä [38]. Ominaisvastuksen yksikkö on ohmimetri ( $\Omega\text{m}$ ). Korroosiovirtaan yhdistettävänä sähkösuurena sitä mitataankin useimmin, kun etsitään viitteitä maaperän aiheuttamasta korroosioriskistä [42]. Tästä syystä myös Suomessa paalutusohjeissa on mainittu ominaisvastusmittaamiset yhtenä vaihtoehtona arvioida korroosioriskiä [43].

Ominaisvastus on maaperän kosteuden ja siihen liuenneiden virtaa kuljettavien ionien konsentraation funktio [41]. Korkea vesipitoisuus tyypillisesti laskee ominaisvastusta, sillä tällöin korroosiovirralla on suuremmat alueet, joiden kautta kulkea, ja ionit hydratoituvat täydellisemmin. Korkean kosteuspitoisuuden maaperä onkin tyypillisesti ominaisvastukseltaan matalampi [40].

Vastaavasti mitä enemmän liuenneita suoloja on, yleensä sitä matalampi on ominaisvastus. Eri ionit vaikuttavat kuitenkin eri painoarvolla, joka kytkeytyy niiden varaukseen

[40]. Keskeisin näistä ioneista on kloridi-ioni [41]. Myös lämpötila vaikuttaa ominaisvastukseen ja näiden on havaittu olevan kääntäen verrannollisia toisiinsa. Lämpötilan merkitys on kuitenkin suhteessa vähäinen korroosion kannalta [38]. Lisäksi lämpötilan vuotuinen vaihtelu vähenee, mitä syvemmällä maanpinnan alapuolella ollaan, ja jo noin viiden metrin syvyydessä vaihtelu on vähäistä.

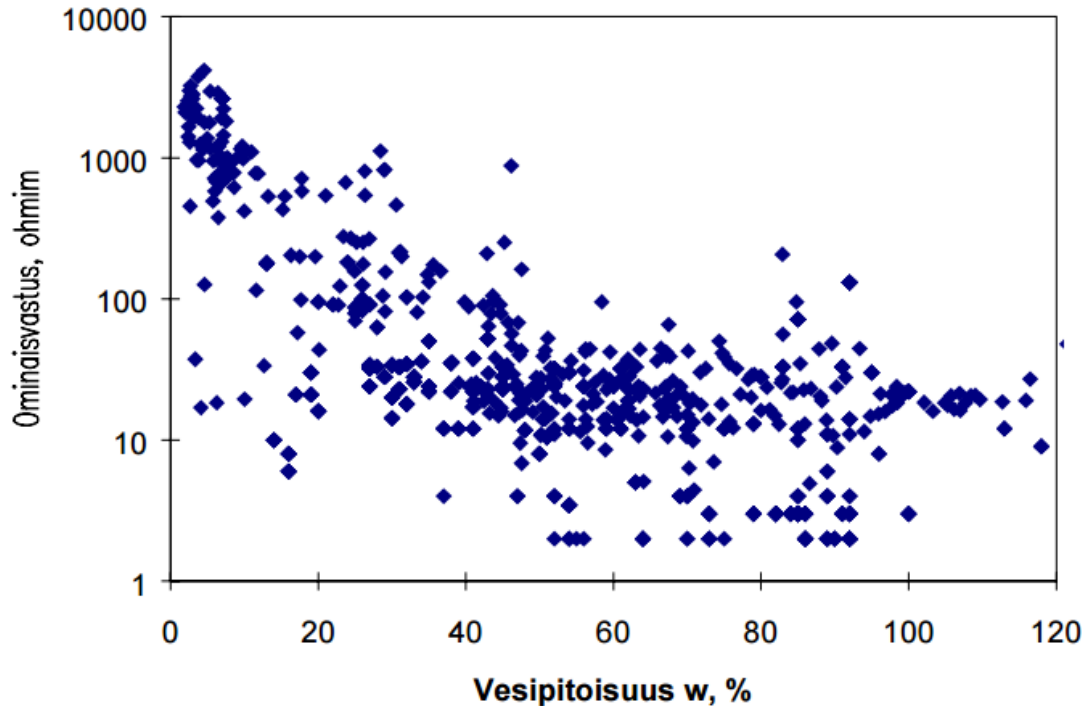
Mitä alhaisempi ominaisvastus on, sitä paremmin se toimii elektrolyytinä ja todennäköisemmin edistää korroosion tapahtumista [38]. Ominaisvastus voi vaihdella meriveden alle 1  $\Omega\text{m}$  ja kuivan hiekan tai soran yli 1000  $\Omega\text{m}$  välillä. Vakavan korroosioriskin luku-arvo on yleisesti alle 10  $\Omega\text{m}$  vaihdellen hieman eri lähteissä. American Water Works Association nimeää arvoksi 7  $\Omega\text{m}$  [41], kun taas Steinrathin saksalaisessa luokituksessa [28] ja amerikkalaisessa teräsputkitekollisuudessa arvo on alle 10  $\Omega\text{m}$  [41].

Taulukoissa ominaisvastuksen yläarvoksi maaperässä ilmenevän korroosioriskin osalta nimetään usein 100  $\Omega\text{m}$  tai vastaava luku-arvo. Tämä arvo perustuu 1940-luvulla tehtyihin havaintoihin, joiden mukaan maaperässä, jonka ominaisvastus on yli 100  $\Omega\text{m}$ , ilmenevä korroosio on niin hidasta, että putkiston korroosioaurioiden korjaaminen on edullisempaa kuin sen suojaaminen. Nykytietämyksellä korkean ominaisvastuksen maaperässä voi kuitenkin tapahtua merkittävää syöpymistä, sillä ilmiöön vaikuttavat esimerkiksi mikrobiologiset seikat, mahdolliset metalliparien muodostumiset sekä happipitoisuuserot eri maakerroksissa. Näin ollen yksittäinen raja-arvo voi antaa suuntaa, mutta myös muut riskitekijät on syytä kartoittaa [42] eikä pelkällä ominaisvastusarvolla pystyttyä selittämään korroosion tapahtumista maaperässä [22].

Suomessa maalajien ominaisvastusarvojen vaihtelu voi olla suurta ja tilastoidut arvot vaihtelevat riippuen maalajista ja sen vesipitoisuudesta. Paalutusohjeet nimeävät teräkselle aggressiivisen ympäristön ominaisvastuksen raja-arvoksi joko 50  $\Omega\text{m}$ , kun mittaus suoritetaan suoraan maastosta, tai 20  $\Omega\text{m}$ , kun mittaus tehdään laboratoriossa näytteillä [43]. Taulukossa 6 on esitetty Suomessa mitattuja ominaisvastusarvoja. Suomessa maan ominaisvastus on lähes aina suurempi kuin 10  $\Omega\text{m}$ , kuten ilmenee kuvasta 13 [22].

**Taulukko 6.** *Suomalaisten maalajien ominaisvastuksia [28].*

Maalaji	Ominaisvastus ( $\Omega\text{m}$ )
Turve	20-250
Lieju	50-250
Savi (märkä)	5-50
Siltti (märkä)	30-200
Hiekka (märkä)	300-2000
Hiekka (kuiva)	1000-3000
Sora (kuiva)	3000-30000
Moreeni	1000-10000



**Kuva 13.** Vesipitoisuuden ja ominaisvastuksen välinen vuorosuhde kivennäismaamateriaaleissa [22].

### 3.3.4 Happamuus ja pH

Maaperän pH:ta on usein yritetty kytkeä sen syövyttävyyteen ja hapanta maaperää pidetään riskialttiina. Korroosio kytkeytyy kuitenkin kokonaishappamuuteen eikä vain pH-arvoon [42].

Happamuutta kuvaava pH-arvo on merkittävää korroosion kannalta usein vain, kun se on alle 4 tai yli 8,5 [41]. Maaperässä tapahtuvan korroosion kannalta merkittävä pH-alue on kuitenkin hyvin kiistanalainen ja sekä ylä- että alarajasta on poikkeavia näkemyksiä. Suomalaisissa tutkimuksissa alle 5 pH-arvoa pidetään korroosion kannalta merkittävänä rajana [22] ja paalutusohjeet nimeävät alle 4,5 ja yli 9 pH:n raja-arvoiksi teräkselle aggressiiviselle ympäristölle [43].

Näiden arvojen välisellä alueella rautaseokset ovat sähköisestä potentiaalista riippuen immuuneja eli eivät syövy, passiivisia eli syöpyvät todella hitaasti tai aktiivisesti syöpyviä. Neutraali pH on suotuisin sulfaatteja pelkistäville bakteereille [41].

Yleisesti ottaen korroosionopeus niin hiiliteräksille kuin sinkkipinnoitetuille teräksille on korkeampi, jos maaperän pH on matala. Erityisesti sinkkipinnoitteelle tämä selittyy sillä, että matalan pH:n ympäristössä sinkkiä suojaavaa kerrosta ei synny tai se ei ole riittävä. Matalan pH:n ympäristössä vedyn muodostuminen voi olla osa katodireaktiota ja siten lisätä korroosiota [44].

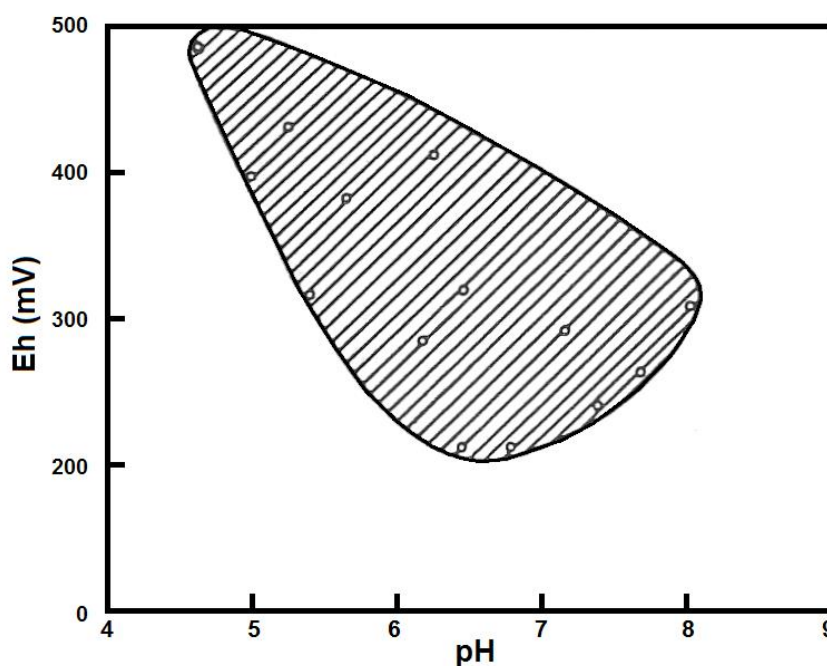
### 3.3.5 Redox-potentiaali

Redox-potentiaalimittauksilla saadaan selville liuoksen hapetus-pelkistyspotentiaali eli elektroniaktiivisuus. Sen suuruuteen vaikuttavat muun muassa pH, lämpötila ja happipitoisuus [45]. Redox-potentiaalilla pyritään erottelamaan aerobiset maaperät anaerobisista maaperistä, jotka voivat tarjota toimintaympäristön sulfaatteja pelkistäville bakteereille. Bakteriaktiivisuuden suhteen tämä ei kuitenkaan ole luotettavin tutkimustapa. Redox-potentiaalia ei ole myöskään suoraan pystytty kytkemään korroosionopeuteen [41]. Lisäksi maaperän redox-potentiaalimittausten tulosten edustavuus pitkäaikaistilanteen suhteen on epävarmaa.

Ilman kanssa kosketuksissa olevan luonnonveden redox-potentiaalin arvot ovat 350-500 mV pH-arvon ollessa yli 5. Maan redox-potentiaalin ja anaerobisten sulfaatteja pelkistävien bakteerien aiheuttaman korroosion välille on esitetty riippuvuutta, joka on esitetty taulukossa 7. Vastaavasti aerobisten rautabakteerien toiminta-alue pH:n ja redox-potentiaalin suhteen esitetään kuvassa 14 [45].

**Taulukko 7.** Redox-potentiaalin ja mikrobiologisen korroosion välinen riippuvuus [45].

Redox-potentiaali (Eh)	Anaerobisten bakteerien aiheuttama korroosio
< 100 mV	voimakas
100-200 mV	kohtalainen
200-400 mV	heikko
> 400 mV	ei korroosiota



**Kuva 14.** Aerobisten rautabakteerien toiminta-alue, muokattu lähteestä [45].



### 3.3.6 Eri kemialliset yhdisteet

Tyypillisimmät kationit maaperässä ovat kalium-, natrium-, magnesium- ja kalsiumionit ja vastaavasti tyypillisimmät anionit ovat karbonaatti-, sulfaatti-, kloridi- ja oksidi-ionit. Näistä yksiarvoiset ionit kulkeutuvat maaperässä helpomman vesiliukoisuutensa johdosta moniarvoisia paremmin.

Ioneilla on jokaisella oma reaktiivisuutensa metallin pinnalla ja kaksi saman ominaisvastuksen maaperää voi reagoida erilailla riippuen siitä, mitä ioneja niissä esiintyy. Näin ollen suolojen kokonaismäärä ei suoraan korreloi maaperän syövyttävyyden kanssa, jos ionit kykenevät muodostamaan sopivanlaisia yhdisteitä. Esimerkiksi kalsium ja magnesium pyrkivät muodostamaan liukenemattomia oksidi- ja karbonaattiyhdisteitä emäksisessä ympäristössä ja nämä voivat vähentää korroosiota muodostamalla suojaavia kerroksia [40].

Kloridi-ionien kasvava läsnäolo laskee maan ja veden ominaisvastusta. Ne toimivat myös katodien depolarisoijina. Näin ollen korkeat kloridikonsentraatiot maan kosteudessa kasvattavat korroosionopeutta [27]. Maakerroksissa kloridin aikaansaama korroosion lisääntymistä ei ole havaittu, kun kloridipitoisuudet ovat olleet alle 300 mg/l [46]. Tämä kytkeytyy aikaisemmin käsiteltyyn maaperän ominaisvastukseen, sillä tällöin ominaisvastus on suurempi kuin 20  $\Omega$ m. Kloridipitoisuuden määrittäminen on kuitenkin suositeltavaa suorittaa [41].

Sulfidien läsnäolo on usein merkki sulfaatteja pelkistävästä bakteereista, jotka voivat muuttaa pH:n happamampaan suuntaan aiheuttaen korroosion kiihtymisen [27].

### 3.3.7 Mikrobiologiset tekijät

Runsaasti rikkiä sisältävät maakerrokset kuten sulfidimaakerrokset luetaan tavanomaisista poikkeaviksi ja eräissä tapauksissa aggressiivisiksi olosuhteiksi. Sulfidipitoinen ympäristö voi olla syy korroosioon tai kasvattaa sen nopeutta. Esimerkiksi merisedimentit ovat pääasiassa anaerobisia ja sulfaatteja pelkistävien bakteerien (SRB) toimintaa pidetään niissä pääasiallisena syynä korroosiolle (MIC, microbiologically influenced corrosion tai microbially induced corrosion) [47].

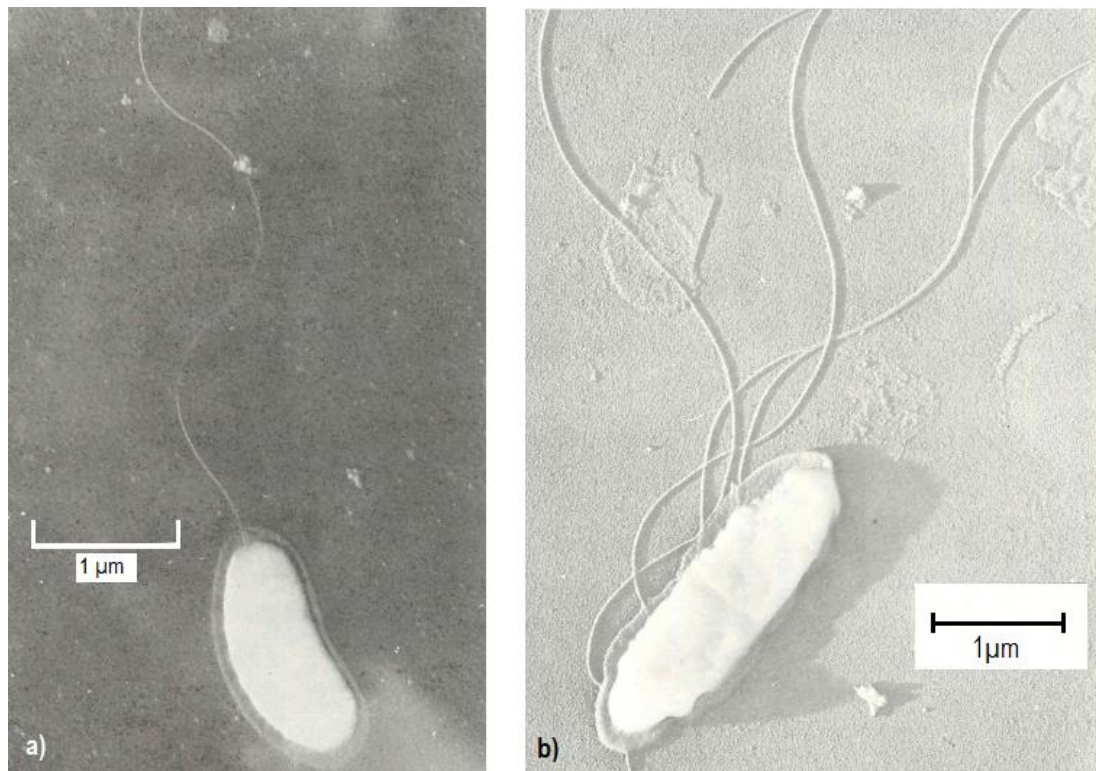
Kaikki sulfidimaakerrokset eivät välttämättä kuitenkaan ole aggressiivisia. Mikrobiologisen korroosion mahdollisuutta voidaan tutkia määrittämällä sulfidipitoisuus ja redox-potentiaali [42].

Huokosvesi on maasedimenttien väleihin, huokosiin, jäävää vettä ja siinä havaitaan usein sulfaattipitoisuuden väheneminen johtuen sulfaatteja pelkistävien bakteerien toiminnasta. Sulfaattien bakteeriperäinen pelkistyminen sulfideiksi on merkittävä osa esimerkiksi merisedimenttien rikkikiertoa. Sulfidien muodostuminen johtaa rautasulfidin saostumiseen

antaen maakerrokselle tumman tai mustan värin ja voi tuottaa kerrokseen vapaata rikki-sulfidia ( $\text{H}_2\text{S}$ ) [47]. Pääosa suomalaisista savista on harmaita, ellei humus ole värjännyt niitä ruskeiksi. Myös sulfidisavet muuttuvat harmaiksi, kun sulfidit hapettuvat sulfaateiksi.

Redox-potentiaali mitataan maastossa suoraan maavedestä. Mikrobiologinen korroosio on mahdollista, jos redox-potentiaali on alle 200 mV (NHE), ja voimakasta, jos redox-potentiaali on alle 100 mV (NHE). Tällöin maassa vallitsevat pelkistävät olosuhteet [45].

Anaerobiset *Desulfovibrio*- ja *Desulfotomaculum*-sukujen bakteerit ovat merkittävimmät sulfaatteja pelkistävät mikrobit. Esimerkkilajit näihin sukuihin kuuluvista bakteereista on esitettyä kuvassa 15. Lisäksi kuvassa 16 on esitetty *Desulfovibrio*-sukuisen bakteerin esiintyminen galvanoidun teräksen pinnalla.

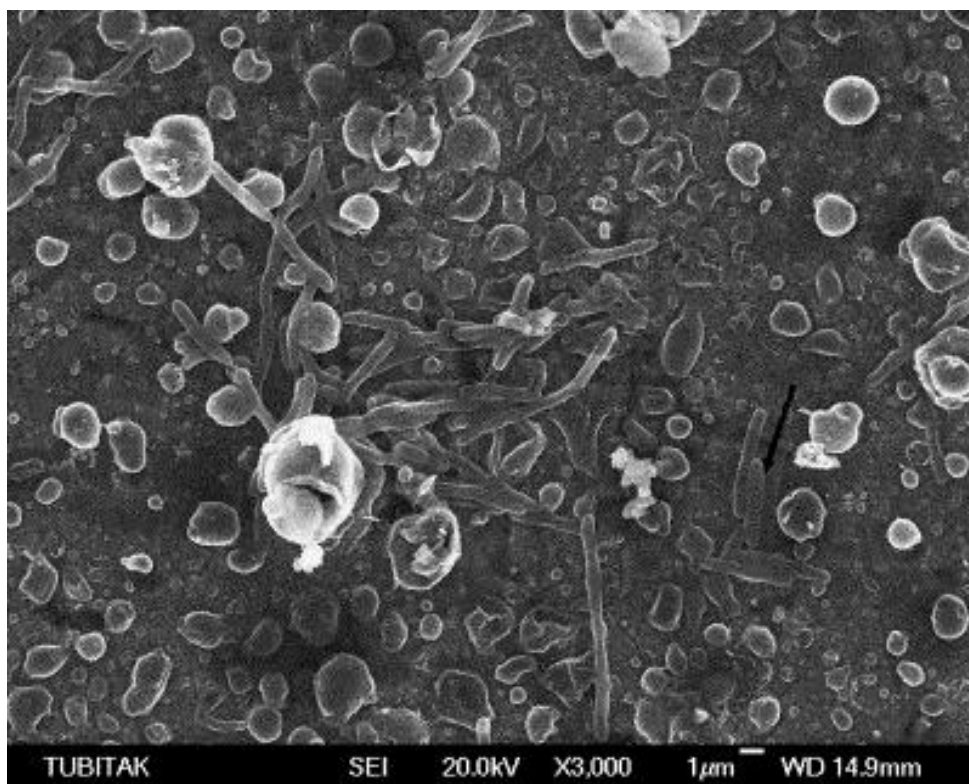


**Kuva 15.** Elektronimikroskooppikuvat kahdesta sulfaatteja pelkistäviin bakteereihin kuuluvasta lajista: a) *Desulfovibrio desulfuricans* b) *Desulfotomaculum nigrificans* [48].

*Desulfovibrio*- ja *Desulfotomaculum*-sukujen bakteerit pelkistävät sulfaatteja hapettomassa ja pH:ltaan kohtuullisessa ympäristössä yhdessä vedyn tai orgaanisen aineksen kanssa muodostaen rautasulfideja ja rautahydroksideja [40; 41]. Ne voivat myös aktiivoida sähköparin katodisia alueita kuluttamalla vetyä tai tuottaa syövyttäviä lopputuotteita [41].

Vastaavasti aerobisten ympäristöjen mikro-organismit voivat vaikuttaa anodisiin alueisiin absorboimalla happea ja tuottamalla happoja [41]. Esimerkiksi rikkipitoisessa maassa

tällaiset bakteerit voivat myös aiheuttaa korroosiota. Acidithiobacillus-suvun bakteerien aineenvaihdunnan seurauksena rikkiä hapettuu muodostaen rikkihappoa ja Acidithiobacillus thiooxidans -bakteerit voivat tuottaa vahvuudeltaan jopa 12 % rikkihappoa. Tämän ja toisten vastaavien bakteerien kehittyminen vaatii matalan pH:n (2-4) eli happaman ympäristön [40].

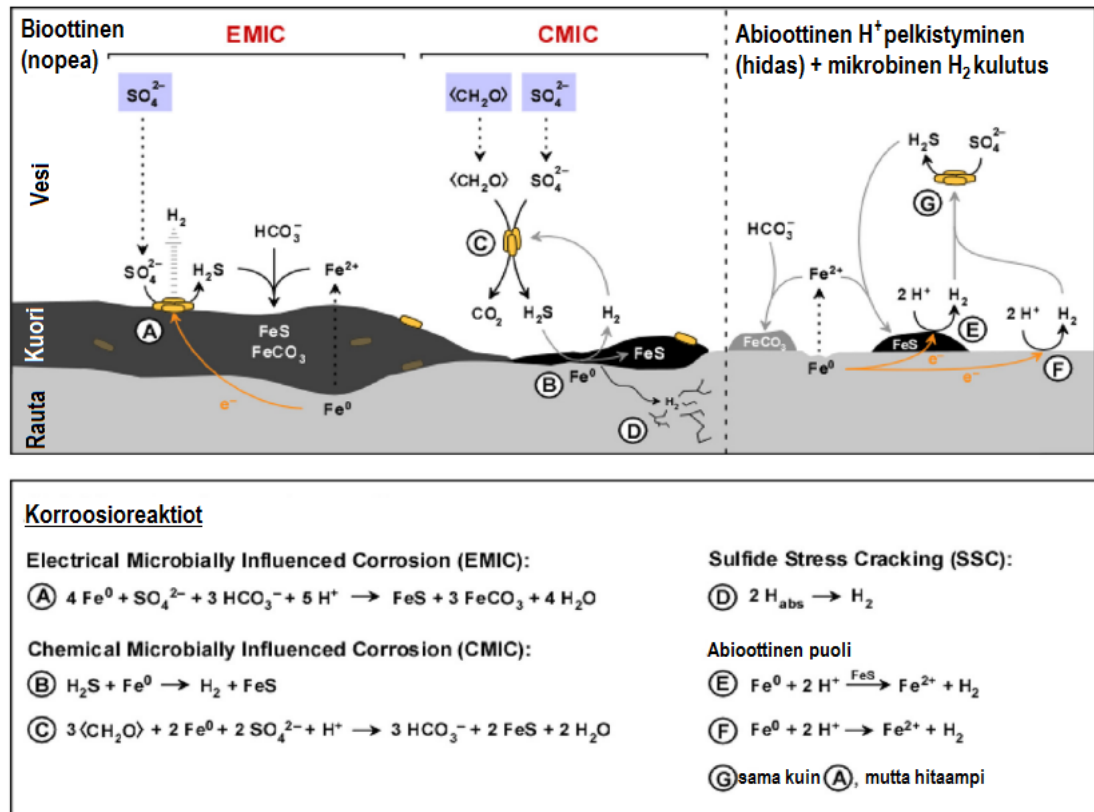


**Kuva 16.** Pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva *Desulfovibrio*-suvun bakteerien esiintymisestä galvanoidun teräsnäytteen pinnalla [49].

Rautametallien bakteeriperäiseen korroosioon liittyvät mekanismit ovat osittain epäselvät. Eri tekijöiden on uskottu vaikuttavan bakteerien aiheuttamaan korroosion maassa. Korroosionopeuden määrittäväksi tekijäksi on epäilty mikrobien vedyn hyödynnyskykyä tai niiden aineenvaihdunnan tuottamien syövyttävien aineiden vaikutusta, mutta bakteerimäärä ei kuitenkaan ole ollut suoraan verrannollinen korroosionopeuteen. Saostuneen rautasulfidin vaikutusta katodiseen reaktioon, suojaavien tai ei-suojaavien rautasulfidien muodostumista katodiselle alueelle, sulfidien vaikutusta anodiseen reaktioon ja galvaanisen kennon muodostumista rautasulfidien takia on pidetty merkittävimpinä mikrobiologiseen korroosioon vaikuttavina tekijöinä [47].

Nykytiedon valossa SRB:t vaikuttavat kahdella tavalla hapettomaan raudan korroosioon: sähköisesti (EMIC, electrical microbially influenced corrosion) tai kemiallisesti (CMIC, chemical microbially influenced corrosion) [50]. Nämä toimintatavat reaktioineen on esitettyä kuvassa 17. Kaikki sulfaatteja pelkistävät bakteerit vaikuttavat kemiallisesti, mutta sähköistä vaikutusta on havaittu vain osalla bakteerilajeista [51].

Kemiallisesti vaikuttavat SRB:t pelkistävät sulfaatteja muodostaen vetysulfidia, joka reagoi raudan kanssa rautasulfidiksi. Sähköisesti vaikuttavat bakteerit kykenevät irrottamaan elektroneja suoraan raudasta tämän rautasulfidista ja muista korroosiotuotteista muodostuneen kuoren kautta, kuten kuvasta 17 ilmenee. Muodostunut rautasulfidi voi myös katalysoida vedyn pelkistymistä [51].



**Kuva 17.** Sulfaatteja pelkistävien bakteerien toimintatavat, muokattu lähteestä [51].

Suomessa mikrobiologisen korroosion kannalta mahdollisesti aktiivisia sulfidisavialueita ovat Litorinavaiheen orgaanista ainesta sisältävät sedimentit Pohjanmaalla, Varsinais-Suomessa ja Etelä-Suomessa. Litorinavaiheella tarkoitetaan viimeisen jääkauden jälkeistä ajanjaksoa noin 7 500–4 000 eaa., jolloin Itämeren pinta oli nykyistä paljon korkeammalla ja meri ulottui esimerkiksi Pohjanmaalla pidemmälle nykyiseen sisämaahan. Litorinasedimenttien rikkipitoisuus vaihtelee huomattavasti, mutta rikkipitoisuutta osoittava selvä tunnusmerkki on saven musta väri. Esimerkiksi rakentamiseen liittyvät riskit näissä maaperissä on ryhdytty huomioimaan pohjarakentamisen mitoituksessa [28; 52].

### 3.4 Maaperäkorroosiotutkimus

Ympäri maailmaa tehdyissä maaperäkorroosiotutkimuksissa on pääasiassa keskitytty kahteen tutkimustapaan, kun korroosiotutkimusta on tutkittu. Maaperästä on mitattu sen eri ominaisuuksia ja maaperään on upotettu, pääasiassa kaivettuihin kaivantoihin, erilaisia tutkittavia metallinäytteitä, jotka on määrätyn ajan kuluttua nostettu ylös.

Mitattujen maaperäominaisuuksien ja koenäytteistä mitatun korroosion välille on sitten yritetty muodostaa korrelaatioita. Parhaimmillaankin nämä korrelaatiot ovat olleet heikkoja.

Aikaisemmat tutkimukset ovat keskittyneet pääasiassa luonnon maaperän korroosiokäytäytymiseen. Joitain tuloksia ja havaintoja on kuitenkin tehty myös ihmisen muokkamaasta tai saastuneesta maaperästä.

### **3.4.1 Maaperäkorroosiotutkimus aikaisemmin Suomessa**

Minna Leppänen teki Tampereen teknillisen yliopiston, silloisen Tampereen teknillisen korkeakoulun, rakennustekniikan osaston geotekniikan laitoksella teräspaalujen korroosiota käsittelevän diplomityön 1991-1992. Työn kokeellisessa osuudessa käsiteltiin viidessä kohteessa maaperäkorroosiota. Näistä kohteista kolmessa tutkittava rakenne oli paalu ja kahdessa vaakasuorasti asennettu putki.

Tutkittavien kohteiden maaperänäytteistä mitattiin niiden ominaisuuksia kuten sähkönjohtavuutta ja pH:ta ja maaperässä olleiden teräskappaleiden rakennetta tarkastettiin silmä määräisesti, ultraäänimittauksilla ja työntömitalla. Tutkittavat rakenteet eivät kuitenkaan olleet alun perin suunniteltu tutkittaviksi, joten korroosionopeutta laskettaessa mitaustuloksia ei pystytty vertaamaan niiden tarkkoihin mittoihin vaan saatavilla oleviin nimellisarvoihin.

Kyläsaaren aluetta koskevan nykyisen maaperäkorroosiotutkimuksen kannalta tärkein yksittäinen huomio Leppäsen diplomityöstä on Kyläsaaren jäteveden puhdistamon huolto- ja puhallinrakennuksen perustuksia vahvistamaan tarkoitettujen kahden HE200B-muototeräskappaleen tutkiminen. Näistä mittauksista saatuja tuloksia voitaneen pitää vahvimpana verrokkina tämän pitkäaikaistutkimuksen lopullisille tuloksille.

Ensimmäisen paalun yhteydestä otettiin 50 cm syvyysvälein maaperänäytteet sekä yksi näyte vesirajan alta. Toisen paalun yhteydessä 50 cm syvyysväli säilytettiin, mutta viimeiseltä näytteenottosyvyydeltä otettiin kaksi näytettä. Näiden maaperänäytteiden keskeisimmät tulokset on esitetty taulukoissa 8-10.

**Taulukko 8.** Kyläsaaren jäteveden puhdistamon huolto- ja puhallinrakennukselta otettujen maaperänäytteiden ominaisuuksia [53].

Kohde	Syvyys maanpinnasta (m)	Maalaji	Vesipitoisuus (%)	pH	Ominaisvastus ( $\Omega$ m)	Kokonaisriikki S (%)	$SO_4^{2-}$ -pitoisuus (mg/kg)
1	-1,25	srHk	7,9	8,2/8,9	100,0	0,033	460
	-1,75	srHk	9,3	7,9/8,5	109,9	0,041	140
	-2,25	srHk	13,1	8,0/8,2	454,5	0,008	440
	-2,30	srHk	-	-/8,6	270,3	0,008	200
2	-1,15	HkMr	23,4	-/9,2	25,9	0,489	200
	-1,65	laSa	86,8	2,7/3,0	10,1	0,99	4200
	-2,15	Hk	5,7	5,2/-	-	-	-
	-2,25	laSa	70,7	6,9/6,5	8,3	1,15	4200
	-2,80	-	-	-/7,7	12,1	1,12	3200
	-2,80	saSi	79	6,8/-		-	

Näytteiden geotekniset määritykset, eli raekokojakauman ja vesi- ja humuspitoisuuden määrittäminen, sekä toinen pH-mittaus tehtiin Tampereen teknillisen korkeakoulun geotekniikan laitoksen laboratoriossa. Rautaruukin tutkimuskeskuksen laboratoriossa tehtiin kemiallisia määrityksiä, jotka myös sisälsivät pH:n määrittämisen. Tästä johtuen taulukossa 8 on esitetty kaksi pH-mittaustulosta, jotka poikkeavat hieman toisistaan.

**Taulukko 9.** Kyläsaaren jäteveden puhdistamon huolto- ja puhallinrakennukselta otettujen maaperänäytteiden koostumuksen keskiarvo [53].

Kohde	Koostumus (%)					
	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO
1	3,4	1,0	13,3	70,6	3,7	2,2
2	2,1	2,5	14,4	54,9	3,6	1,8

**Taulukko 10.** Kyläsaaren jäteveden puhdistamon huolto- ja puhallinrakennukselta otettujen maaperänäytteiden raskasmetallipitoisuuksien keskiarvot [53].

Kohde	Pitoisuus (mg/kg)					
	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
1	63	38	458	28	50	98
2	105	25	655	60	38	165

Tuhkaa käsitellään tarkemmin luvussa 4.1 ja tuhkien koostumusta on eritelty luvussa 4.1.1. Luvun 4.1.1 taulukossa 21 esitettyjen tuhkalajien koostumusten nojalla taulukossa 9 esitetyt koostumukset viittaisivat tuhkapitoiseen täyttöön. Taulukossa 21 esimerkiksi turpeiden tuhkat ovat yhdistekoostumukseltaan samankaltaisia kuin taulukossa 9 esitetyt

koostumukset. Taulukon 10 raskasmetallipitoisuudet eivät kuitenkaan ole suuria ja ainoastaan nikkeli ja kromi ylittävät taulukossa 24 esitetyt kynnysarvot.

Maaperänäytteiden kloridipitoisuus oli molemmissa tutkittavissa kohteissa hyvin pieni, alle 0,1 %. Ensimmäisen paalun yhteydessä otettiin myös vesinäyte, joka sisälsi 5,7 % kloridi-ioneja. Leppäsen työ ei kuitenkaan ota tarkemmin kantaa, kuinka kloridipitoisuus on määritelty. Sulfaatti-ionien määrää tässä näytteessä ei ilmoiteta, mutta niitä kuvataan olleen ”runsaasti”. Veden pH on ollut noin 7,4 ja sähkönjohtavuus 63 mS/m (ominaisvastuksena 16  $\Omega$ m).

Ultraääni- ja mekaanisten mittausten perusteella laskettiin näytekappaleiden nimellismittasta yleisen korroosion ja pistemäisen korroosion vuotuiset nopeudet, kun tiedettiin paalutuksen tapahtuneen 14 vuotta ennen tutkimusta. Näin saadut tulokset ovat esitettynä taulukossa 11 paalun yhden sivun suhteen.

**Taulukko 11.** *Kyläsaaren jäteveden puhdistamon huolto- ja puhallinrakennuksen tuentapaalujen nimellismittoihin perustuvat korroosionopeudet [53].*

Kohde	Yleinen korroosio		Pistemäinen korroosio	
	Keskimääräinen nopeus (mm/a)	Maksiminopeus (mm/a)	Keskimääräinen nopeus (mm/a)	Maksiminopeus (mm/a)
1	-	0,011	0,043	0,069
2	0,007	0,018	0,111	0,174

Taulukosta 11 voidaan selvästi nähdä, että vaikka tutkittavat paalut olivat samalla alueella ja siten suhteellisen lyhyen etäisyyden päässä toisistaan, on toiseen kohteeseen kohdistunut korroosio ollut voimakkaampaa erityisesti pistemäisen korroosion suhteen.

Ensimmäisessä paalussa on kaksi paikallisen syöpymisen aluetta noin 1,5 m maanpinnan alapuolella, kun taas toisessa paalussa useita tällaisia alueita 1,6-2,0 m maanpinnan alla. Leppäsen tutkimuksessa esitettyjen piirrosten perusteella pistemäisen korroosion sijainnit eivät suoraan korreloi yleisen korroosion kanssa eli maakerroksen paikalliset tekijät korostuvat.

Leppäsen mukaan yleiselle korroosiolle voidaan esittää useita mahdollisia syitä. Kohteen 1 kohdalla täytemaakerros on sekalainen ja raejakaumaltaan se koostuu pääasiassa soraisesta hiekasta, mutta kivirakeiden joukossa on hienojakoista materiaalia, jonka oletetaan olevan polttolaitosjätettä. Tämä hienompi aines pidättää vettä ja edistää hapen väkevyyseroista johtuvan korroosion tapahtumista. Kohteen 2 paalun ympärillä puolestaan on kostea savikerros, mutta saven yläpuolella pienemmän vesipitoisuuden hiekkakerros. Työssä on oletettu, että veden ja maassa olevan hapen siirtyminen tästä kerroksesta saveen olisi juuri selkein vaikuttava tekijä korroosioon.

Pistekorrosiosuhteen avulla on arvioitu, että kohteessa 2 pistemäisen korroosion nopeus on ollut 2-4 kertaa suurempi kuin tasaisen korroosion nopeus 1,6-2,0 m syvyydellä maanpinnasta, missä paikalliset syöpymät esiintyvät. Näille selittäväksi tekijäksi on osittain nimetty maan suuri sähkönjohtokyky ja osittain sulfaatteja pelkistävien bakteerien aiheuttama mikrobitoiminta, jota johtopäätöstä korkeat sulfaatti- ja kokonaisrikkipitoisuus puolestaan tukisivat. Toisaalta myös täytemaakerroksen ja hiekkakerroksen erilainen koostumus nähdään keskeisenä tekijänä paikalliseen korroosioon, sillä korroosio on keskittynyt kerrosten raja-alueelle. Tällaisten kerrosrajojen yhteydessä myös eri aineiden pitoisuudet saattavat vaihdella.

Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekninen osasto teki vuosina 1979-1987 laajamittaisen selvitystyön kivihiilituhkan käytöstä maarakentamiseen [45]. Tähän kivihiilituhkatutkimukseen sisältyi korroosioanalyysijä, joissa kivihiilituhkan korroosio-ominaisuuksia mitattiin ja eri materiaaleista olleita kappaleita haudattiin tutkimuskenttään marraskuussa 1979 vuoden koeajaksi. Tutkimuskenttä koostui Hanasaaren voimalaitoksen kivihiiliperäisestä lentotuhkasta ja pintakerrokseltaan Salmisaaren voimalaitoksen kivihiiliperäisestä pohjakuonasta. Näissä voimalaitoksissa poltettu kivihiili on ollut pääasiassa puolalaista. Materiaalit tutkittiin Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennusgeologian ja metallurgian laboratorioissa, joissa myös laboratorio-olosuhteissa selvitettiin lentotuhkan korroosio-ominaisuuksia.

Tuhkaprojektissa tehtiin painohäviömittauksiin perustuva lyhyt korroosioselvitys myös vuosina 1981-1982 [45]. Tällöin asennettiin erilaisia metalli- ja teräsbetonikappaleita Helsingissä tuotetusta kivihiilituhkasta rakennettuihin kohteisiin sekä rakeisuudeltaan so-  
raa vastaavaan täytemaahan.

Ominaisvastusmittauksia tehtiin sekä laboratorio-olosuhteissa että tarkemmin määrittämättömän korroosiosondin avulla maastossa. Laboratoriomittauksissa lentotuhkan verrokkimateriaali oli hiekkamoreeni. Maastokohteissa oli käytetty kaikkia Helsingissä syntyviä kivihiilituhkatyyppejä. Laboratoriomittausten keskeisimmät tulokset on esitettynä taulukossa 12.

**Taulukko 12.** Hanasaaren voimalaitoksen lentotuhkan ominaisvastusmittausten tulokset [45].

Tutkittava maa-aines	Kosteus (%)	Ominaisvastus ( $\Omega\text{m}$ )	
		Tuore aines	20 kk jälkeen
Tiivistetty lentotuhka	17	15	70
Hiekkamoreeni	19	1640	1640

Taulukon 12 tuloksista on selvästi nähtävissä, että lentotuhka johtaa sähköä moreenimaa-ainesta paremmin. Lisäksi havaittiin kosteuden alenemisen pienentävän sähkönjohtavuutta.



Maastokohteissa mittaussyvyys vaihteli 0-1,0 m maanpinnan alle. Ominaisvastusarvot olivat pääasiassa alle 10  $\Omega$ m. Suurimmat arvot, 20-65  $\Omega$ m, mitattiin Hanasaaren pohjatuhtasta rakennetulla pallokentällä.

Laboratorio- ja maastomittausten perusteella voidaan todeta, että Helsingissä syntyvä kivihiilituhka johtaa sähköä hyvin verrattuna tavalliseen karkearakeiseen maaperään. Kivihiilituhka voidaan arvioida selvästi syövyttäväksi verrattaessa sen ominaisvastusarvoja esimerkiksi Steinrathin taulukkoarvoihin [28]. Lisäksi se sisältää todennäköisesti palamatonta hiiltä tai koksia, jotka myös kasvattavat korroosioriskiä Steinrathin arviointikriteereissä.

Laboratoriomittauksissa selvitettiin myös Hanasaaren lentotuhkan sekä vertailumateriaalina olleen hiekkamoreenin redox-potentiaali- ja pH-arvot [45]. Nämä tulokset on esitetty taulukossa 13.

**Taulukko 13.** Hanasaaren voimalaitoksen lentotuhkan redox-potentiaali- ja pH-mittausten tulokset [45].

Tutkittava maa-aines	pH	Redoxpotentiaali (mV)
Lentotuhka, voimakkaasti uuttunut	8,4	+533
Lentotuhka, pintaosa	9,2	+549
Lentotuhka, uuttunut	8,8	+535
Moreeni, pintaosa	6	+446
Moreeni, pohja	6,6	+435
Lentotuhka, tuore	11,4	+488

Taulukossa 13 moreenin ja tuoreen lentotuhkan redox-potentiaaliarvot vastaavat luvussa 3.3.5 esitettyjä luonnonveden arvoja. Vanhemmilla lentotuhilla arvot ovat hieman tätä korkeampia.

Taulukossa 13 esitettyjen pH- ja redox-potentiaaliarvojen ja luvussa 3.3.5 esitetyn taulukon 7 perusteella sulfaatti- ja rautabakteerien elintoiminta ei ole mahdollista lentotuhkassa toisin kuin moreenissa. Tämän perusteella mikrobiologista korroosiota ei tapahdu näissä olosuhteissa juurikaan.

Helsingissä tehdyissä kenttäkokeissa saatiin käytännön tietoa kivihiilituhkan korroosiovaikutuksesta. Korroosiokokeissa kosteusolosuhteet vaihtelivat tuhkatyypistä ja vuodenaikasta riippuen. Materiaalit tutkittiin kenttäkokeen jälkeen silmämääräisesti etsimällä niistä merkkejä korroosiosta ja mittaamalla niiden painohäviöt. Taulukossa 14 on esitetty keskeisimmät havainnot tutkituilla teräsmateriaaleilla. Taulukossa esitetty 100 vuoden aikana tapahtuva materiaalin poistuminen on laskettu vuodessa tapahtuvan painohäviön perusteella.

**Taulukko 14.** Erityyppisten terästen syöpyminen kivihiilituhkassa [45].

Koekappale	Tuhkatyyppi	Painohäviö vuodessa (g/dm <sup>2</sup> )	Korroosio 100 vuodessa (mm/100a)	Syöpymisaste
teräs	lujittuva lentotuhka	3,2	4,1	voimakas
	pohjatuhka	2,4	3,1	voimakas
	pohjakuona	0,3	0,4	lievää tai kohtalaista
	sora	1,2	1,5	voimakas
harjateräs	lujittuva lentotuhka	4	5,1	voimakas
	pohjatuhka	3,6	4,6	voimakas
	pohjakuona	1,2	1,5	lievää tai kohtalaista
	sora	ei mitattu	-	voimakas
kuumasinkitty teräs	lujittuva lentotuhka	0,8	1,0	lievää tai kohtalaista
	pohjatuhka	1,7	2,2	voimakas
	pohjakuona	1,2	1,5	voimakas
	sora	0	0	vähäistä
galvanoitu teräs	lujittuva lentotuhka	ei mitattu	-	voimakas
	pohjatuhka	ei mitattu	-	voimakas
	pohjakuona	ei mitattu	-	voimakas
	sora	ei mitattu	-	lievää tai kohtalaista

Taulukosta 14 käy ilmi, että teräksenä ja harjateräksenä listatut koemateriaalit menettivät eniten massastaan lentotuhkassa ja pohjatuhkassa. Teräskappaleella tämä massahäviö oli soraan verrattuna kaksin- tai kolminkertainen. Koska teräslajeja ei ole eritelty tämän tarkemmin, voitaneen olettaa, että koemateriaalit ovat olleet tyypillisiä käytettyjä rakenne-teräksiä.

Havukainen et al. eivät kuitenkaan erittele, kuinka kuumasinkitty ja galvanoitu teräsnäyte ovat eronneet toisistaan. Galvanointi on tyypillisesti elektrolyyttistä sinkitsemistä, mutta joissain yhteyksissä myös upotussinkitystä kutsutaan galvanoinniksi. Lisäksi sinkkikerrosten paksuuteen ei oteta kantaa, vaikka pinnoitteen paksuus on riippuvainen käytetystä menetelmästä. Esitetyistä tuloksista tai raportista ei myöskään käy ilmi, onko kuumasinkityn teräksen painohäviö ollut todellista teräksen korroosiota vai ainoastaan suojaavaan sinkkikerroksen syöpymistä.

### 3.4.2 Maaperäkorroosiotutkimus muissa Pohjoismaissa

Vuonna 1979 Ruotsin Korroosioinstituutti aloitti pitkäaikaistutkimuksen tarkoituksenaan kartoittaa eri metallien korroosiota ruotsalaisessa maaperässä ja eri maaperäominaisuuksien vaikutusta korroosioon [44; 54; 55]. Tämän lisäksi Ruotsissa on tehty myös muita tutkimuksia maaperään asennettuihin kohteisiin liittyen. Näissä on tutkittu esimerkiksi korroosion vaikutuksia lyhemmällä aikajänteellä [56] tai selvitetty paalujen korroosiota [57-59] ja mahdollisuuksia korroosiosuojata paaluja erilaisilla pinnoitteilla [60].

Ruotsin Korroosioinstituutin pitkäaikaistutkimuksessa tutkimuspisteitä oli seitsemän eri puolilla Ruotsia siten, että ne pyrkivät mahdollisimman kattavasti edustamaan Ruotsissa esiintyviä maaperiä. Niihin kuului kaksi savimaaperää (Enköping ja Sollentuna), silttinen sulfidipitoinen musta savi (Kramfors), kaksi liejusavimaaperää (Göteborg ja Tukholma), turvemaata (Laxå) ja hiekkamaata (Linköping). Savimaaperistä kaikki muut paitsi Enköping ovat muodostuneet jääkauden jälkeen. Pohjaveden pinta sijaitsi tutkimuspisteissä syksyisin noin 1 m syvyydellä maanpinnasta ja sen kausivaihtelut olivat pieniä [54; 55].

Tutkimuspisteiden maaperästä tehtiin maanäyteanalyysit syksyllä 1986. Analyysissä määritettiin 0,7 m ja 1,7 m syvyydeltä muun muassa maalaji, ominaisvastus, pH, kosteuspitoisuus, kokonaisrikkipitoisuus sekä sulfidi-, sulfaatti- ja kloridi-ionipitoisuudet. Maanäyteanalyysien tulokset on esitetty taulukoissa 15-16.

Taulukoissa 15-17 Linköpingille on ilmoitettu kaksi eri tutkimuspistettä. Tämä johtuu siitä, että tutkimusalueella pohjavedenpinta vaihtelee. Jotta toinen näyte olisi pohjaveden tason alapuolella, täytyi se asentaa eri paikkaan. Linköping 1 -tutkimuspisteessä maaperä on hiekkaa ja Linköping 2 -tutkimuspisteessä maaperä on vesikylläistä soraista hiekkaa. Näiden pisteiden välinen etäisyys toisistaan on noin 100 m [44; 55].

Tässä ruotsalaistutkimuksessa tutkittavat näytteet olivat teräslattoja ja levyjä. Latat olivat hiiliterästä ja kooltaan 2000x100x15 mm. Levyt olivat hiiliterästä, kuumasinkittyä hiiliterästä ja alumiinisinkkipinnoitettua terästä. Kooltaan hiiliteräksiset levyt olivat 150x100x3 mm, kuumasinkityt olivat 150x100x2 mm ja alumiinisinkkipinnoitetut levyt olivat 150x100x1,5 mm [44; 55]. Käytetty hiiliteräs oli SS 1312-00, joka on ruotsalaisen standardin SS 14 13 12 mukainen ja vastaa EN 10025-2 standardin mukaista rakenneterästä S235JRG2 [55; 61]. Alumiinisinkin pinnoitepaksuus oli 25 µm [44] ja kuumasinkityn pinnoitteen paksuus vaihteli 65-290 µm välillä paksuuden keskiarvon ollessa 165 µm [44; 55].

**Taulukko 15.** Ruotsalaistutkimuksen maaperäanalyysitulokset [44; 54; 55].

Tutkimuspaikka	Syvyys (m)	Maalaji	Ominaisvastus ( $\Omega\text{m}$ )	Vesipitoisuus (m-% kosteasta aineesta)	pH
Enköping	0,7	silttinen savi	33	31	6,6
	1,7	silttinen savi	35	32	6,9
Sollentuna	0,7	silttinen savi	38	41	4,3
	1,7	silttinen savi	12	48	6,3
Kramfors	0,7	silttinen savi	26	33	6,0
	1,7	silttinen savi	14	30	6,5
Göteborg	0,7	liejusavi	17	41	4,4
	1,7	liejusavi	3	54	7,4
Tukholma	0,7	liejusavi	52	43	4,2
	1,7	liejusavi	10	51	5,4
Laxå	0,7	turve	72	85	4,3
	1,7	turve	131	92	4,2
Linköping 1	0,7	hiekkä	2620	7	5,7
Linköping 2	0,7	sorainen hiekkä	179	12	8,0

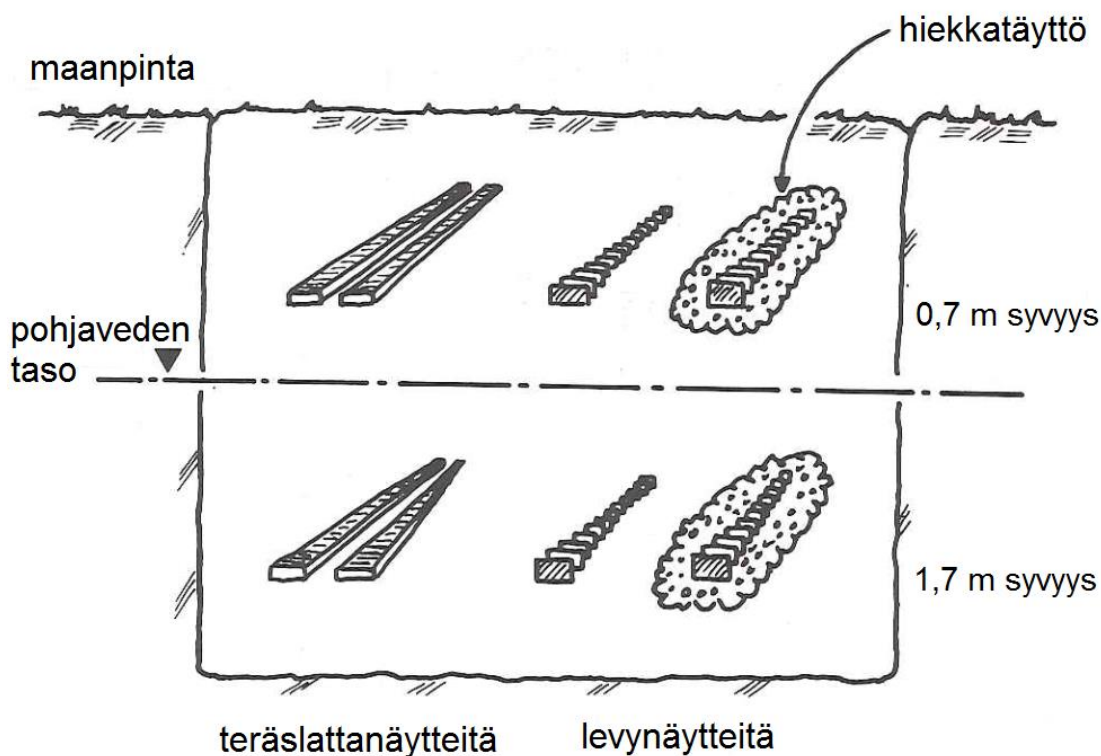
**Taulukko 16.** Ruotsalaistutkimuksen maaperäanalyysitulokset [44; 54; 55].

Tutkimuspaikka	Syvyys (m)	Rikkiyhdisteet (mg/kg kuiva-aineessa)			Cl <sup>-</sup> -pitoisuus (mg/kg kuiva-aineessa)
		S <sup>2-</sup> -pitoisuus	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -pitoisuus	Rikkiä yhteensä	
Enköping	0,7	7	21	190	20
	1,7	7	29	150	20
Sollentuna	0,7	8	202	2090	34
	1,7	288	526	10300	22
Kramfors	0,7	238	49	2030	50
	1,7	347	47	1240	60
Göteborg	0,7	8	412	1480	170
	1,7	82	322	14600	2200
Tukholma	0,7	8	188	1840	30
	1,7	19	758	6400	140
Laxå	0,7	<61	36	120	180
	1,7	<31	41	550	220
Linköping 1	0,7	<5	6	90	20
Linköping 2	0,7	<5	8	140	20

Teräslatat asennettiin maaperään 1979 ja levyt vuosina 1983 ja 1985 kuvan 18 osoittamalla tavalla. Kuten kuvasta 18 ilmenee, alkuperäisen maa-aineksen lisäksi levynäytesarjoja sijoitettiin hiekkatäyttöön. Hiekkatäytöllä haluttiin tutkia, vähentääkö tasalaatuinen hiekkatäyttö yleistä tai pistemäistä korroosiota.

Korroosion ilmenemistä tutkittiin ensin teräslattojen oltua maassa neljä vuotta ja levyjen oltu maassa kolme vuotta. Näytteiden korroosionopeutta tutkittiin massahäviön perusteella. Korroosiokuoppien syvyydet mitattiin neulainstrumentilla [44].

Levynäytteitä tutkittiin myöhemmin niiden oltua asennettuina tutkimuspisteissä noin 7 ja 18 vuotta pois lukien Kramforsin tutkimuspiste, missä näytteet olivat maassa noin 5 vuotta, ja Sollentunan tutkimuspiste, missä näytteet olivat kauimmillaan yli 24 vuotta. Tarkemmat korroosioaltistusajat käyvät ilmi taulukoista 17 ja 18. Myös tällöin yleinen korroosio määritettiin massahäviön perusteella, kun taas pistemäisen korroosion syvyys mitattiin mikroskoopilla [55].



**Kuva 18.** Ruotsalaisten tutkimuksessaan käyttämä koejärjestely, muokattu lähteestä [44].

Ruotsalaistutkimuksen mittaustuloksista käy ilmi, että kaikilla teräslatoilla ja suurimmalla osalla pinnoittamattomia teräslevyjä korroosionopeus on suurempi pohjaveden tason yläpuolella kuin alapuolella. Mahdollisiksi syiksi tälle esitetään maan parempaa ilmastumista sekä matalampaa pH-arvoa. Pohjaveden kuvataan toimivan hapen siirtymistä hidastavana esteenä maaperässä, sillä siinä, missä pohjaveden tason yläpuolella happi dif-

funtoituu maaperän huokosissa kaasuna, tapahtuu hapen diffuusio pohjavesitason alla veden liuenneena. Tällöin katodilla tapahtuva sähkökemiallinen reaktio vaikeutuu ja siten korroosionopeus hidastuu [44].

**Taulukko 17.** *Hiiliteräslevynäytteiden korroosionopeudet Korroosioinstituutin eri tutkimuspisteissä [55].*

Tutkimuspaikka	Tutkimusaika (vuotta)	Korroosionopeus mm/100 vuotta			
		0,7 m syvyydessä (Kramforsissa 1,2 m syvyydessä)		1,7 m syvyydessä (Kramforsissa 2,2 m syvyydessä)	
		Yleinen korroosio	Pistemäinen korroosio	Yleinen korroosio	Pistemäinen korroosio
Enköping	1,00	2,4		1,4	
	2,82	1,3		0,8	
	6,95	2,2	15	1,1	5,8
	17,79	1,7	9,2	0,8	3,4
Sollentuna	1,33	2,5		0,7	
	3,01	1,4		0,6	
	7,14	-	-	1,1	3,2
	24,71	1,2	3,6	0,5	1,7
Kramfors	1,05	1,1		1,4	
	2,87	0,7	5,9	0,9	4,8
	4,94	1,2	5,1	0,6	2,1
Göteborg	1,01	2,3		1,9	
	2,83	2,8		1,3	
	7,01	2,9	18,9	1,8	6,2
	18,01	2,3	13,5	1,4	4,4
Tukholma	1,09	3,7		0,8	
	3,04	3,8		1,6	
	8,20	1,7	9,4	1,0	5,4
	18,08	1,3	7,0	0,8	4,6
Laxå	1,21	2,9		1,8	
	3,12	1,7		2,0	
	7,28	1,5	7,9	1,4	3,5
	18,24	1,1	3,0	1,2	1,4
Linköping 1	1,02	1,2			
	2,84	0,8			
	7,02	0,6	6,0		
	18,00	0,4	3,5		
Linköping 2	1,02	1,9			
	3,03	1,3			
	7,02	1,1	1,6		
	18,00	0,7	1,4		

**Taulukko 18.** *Hiiliteräslevynäytteiden korroosionopeudet Korroosioinstituutin eri tutkimuspisteissä, kun tutkimuspisteissä oli kuvan 18 mukainen hiekkatäyttö [55].*

Tutkimuspaikka	Tutkimusaika (vuotta)	Korroosionopeus mm/100 vuotta			
		0,7 m syvyydessä hiekkatäytössä		1,7 m syvyydessä hiekkatäytössä	
		Yleinen korroosio	Pistemäinen korroosio	Yleinen korroosio	Pistemäinen korroosio
Enköping	1,00	4,6	-	1,4	-
	2,82	2,3	-	0,9	-
	6,95	1,7	9,5	1,5	5,1
	17,79	1,5	7,1	0,9	2,6
Sollentuna	1,33	2,5	-	0,9	-
	3,01	1,8	-	1,3	-
	7,14	1,7	7,8	0,8	2,5
	24,71	1,3	5,2	0,6	1,4
Kramfors	1,05	3,5	-	1,6	-
	2,87	2,5	6,5	1,0	5,1
	4,94	2,0	10,6	0,6	4,0
Göteborg	1,01	3,7	-	1,5	-
	2,83	3,4	-	2,3	-
	7,01	1,9	10,6	1,5	7,6
	18,01	1,7	8,6	1,1	4,2
Tukholma	1,09	4,2	-	1,1	-
	3,04	2,1	-	2,7	-
	8,20	1,8	10,5	1,9	6,5
	18,08	1,2	7,7	1,2	5,0
Laxå	1,21	0,9	-	0,9	-
	3,12	0,7	-	0,5	-
	7,28	0,5	4,1	0,4	5,2
	18,24	0,4	3,0	0,3	5,0

Teräslevynäytteillä kuoppakorroosio oli hiekkatäyttöjen yhteydessä selkeästi suurempaa pohjavesitason yläpuolella kuin alapuolella. Pinnoitetuilla näytteillä ei esiintynyt selkeää korrelaatiota pohjaveden esiintymisen suhteen.

Teräslevynäytteillä korroosionopeus oli kahta tutkimuspistettä lukuunottamatta korkeampi hiekkatäytössä kuin alkuperäisessä maa-aineksessa. Hiekkatäytöllä ei siis havaittu mitään teräsnäytteiden yleistä tai pistemäistä korroosiota vähentävää vaikutusta tutkimuksessa. Sen sijaan sinkkipinnoitettujen ja alumiinisinkkipinnoitettujen näytteiden korroosionopeus oli pääsääntöisesti pienempi hiekkatäytössä kuin alkuperäisessä maa-aineksessa.

Hiekan käytettyihin muihin täyttömateriaaleihin verrattuna suurempaa vedenläpäisykykyä pidetään syynä teräsnäytteiden korkeampaan korroosionopeuteen, sillä tällöin happi pääsee helpommin siirtymään maapohjan ilmasta ja vedestä metallin pinnalle ja edisti-

mään katodisen reaktion kulkua. Eräiden tutkimuspisteiden poikkeavat tulokset voidaan selittää sillä, että hiekka poikkeaa huomattavasti näiden tutkimuskohteiden alkuperäisestä maaperästä ja hiekan ominaisvastus on todella korkea näissä kohteissa.

Yleisesti ottaen teräsnäytteiden korroosionopeus oli korkein liejusavissa ja matalin hiekassa. Tukholman alueen liejusavi oli syövyttävintä tutkitulle rakenneteräkselle niin yleisen kuin pistemäisen korroosion kannalta. Siellä teräslatoista ja teräslevyistä määritettiin lyhyen ajan tutkimuksissa yleisen korroosion korroosionopeudeksi yli 3,5 mm/100 vuotta, mutta kuten taulukoista 17 käy ilmi, hidastuu tässä ympäristössä tapahtuva syöpyminen selvästi, kun tutkimuksen aikajännettä kasvatetaan. Taulukon 17 mukaan Göteborgin tutkimuspisteen liejusavessa korroosionopeus hidastuu kuitenkin vähemmän, vaikka tutkimuksen aikajännettä pidennetään. Vinka toteaa, että tämän tutkimuksen nojalla hiiliteräkselle voi yleisesti arvioida korroosioksi 2 mm/100 vuotta [55].

### 3.4.3 Maaperäkorroosiotutkimus Yhdysvalloissa

National Institute of Standards and Technology (NIST) on Yhdysvaltain kauppaministeriön alaisuudessa toimiva standardoimisvirasto [62], joka aiemmin tunnettiin nimellä National Bureau of Standards (NBS). Tämän virasto on tehnyt maakorroosiotutkimuksia jo 1910-luvulta lähtien keskittyen ensin hajavirtojen korroosiovaikutukseen. 1920-luvulla tutkimukset laajenivat yleisemmiksi maakorroosiotutkimuksiksi [32]. Vuoteen 1952 mennessä tuhansia metallisia korroosiotutkimusnäytteitä oli kaivettu maasta [63]. Nämä tutkimustulokset koottiin vuonna 1957 kattavaksi teokseksi [64]. Korroosiotutkimusta on tehty virastossa myös tämän jälkeen [63; 65-67].

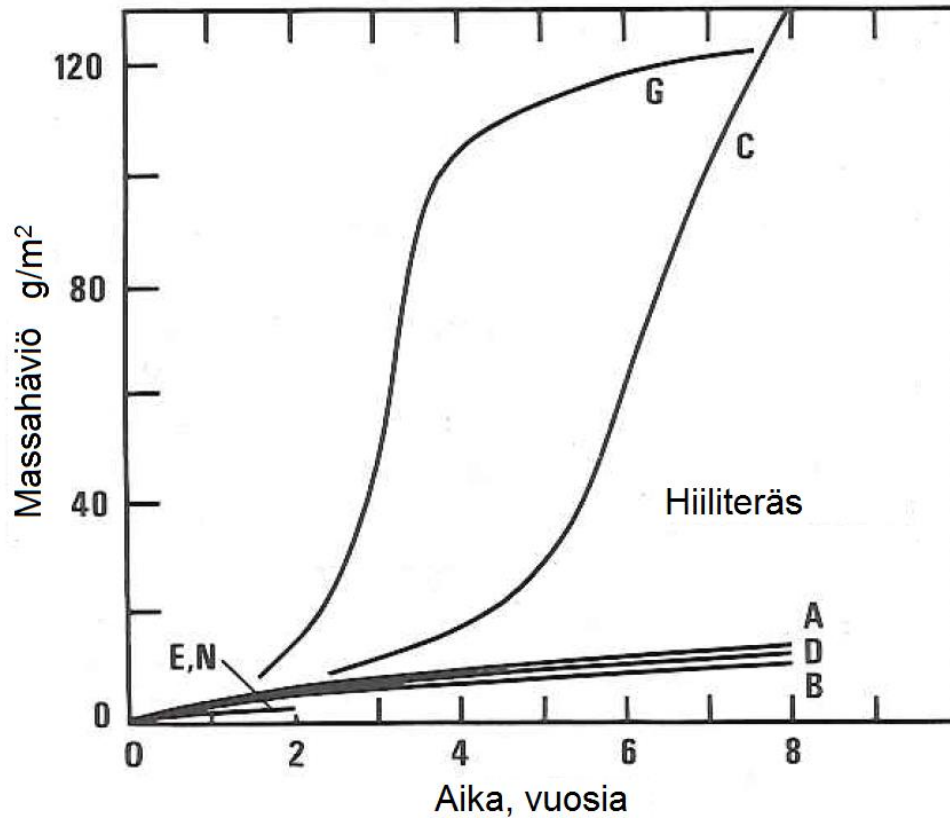
Tutkimusten avulla on pyritty arvioimaan useiden tekijöiden, kuten maalajin, ominaisvastuksen, pH:n ja redox-potentiaalin, merkitystä maan syövyttävyydelle. Näitä tutkimuksia varten NIST on ylläpitänyt Yhdysvalloissa seitsemää maakorroosiotutkimuspaikkaa [38], joiden ominaisuudet on esitettynä taulukossa 19.

**Taulukko 19.** *NIST:n maaperäkorroosiotutkimuspaikat [38].*

Tutkimuspaikan tunnus	Maalaji	Kuivatus	pH	Redox-potentiaali (mV)	Ominaisvastus ( $\Omega$ m)
A	Hiekkainen siltti	Hyvä	8,8	-	60-260
B	Siltti	Hyvä	5,4	+381	130-370
C	Savi	Heikko	4,3	+215	4-11
D	Hiekka	Hyvä	5,6	+427	140-570
E	Hiekka	Heikko	7,1	+556	130-490
G	Marskimaa	Heikko	5,6	-86	4-150
N	Hiesusavi (silttinen savi)	Kohtalainen	6,8	-273	70-100

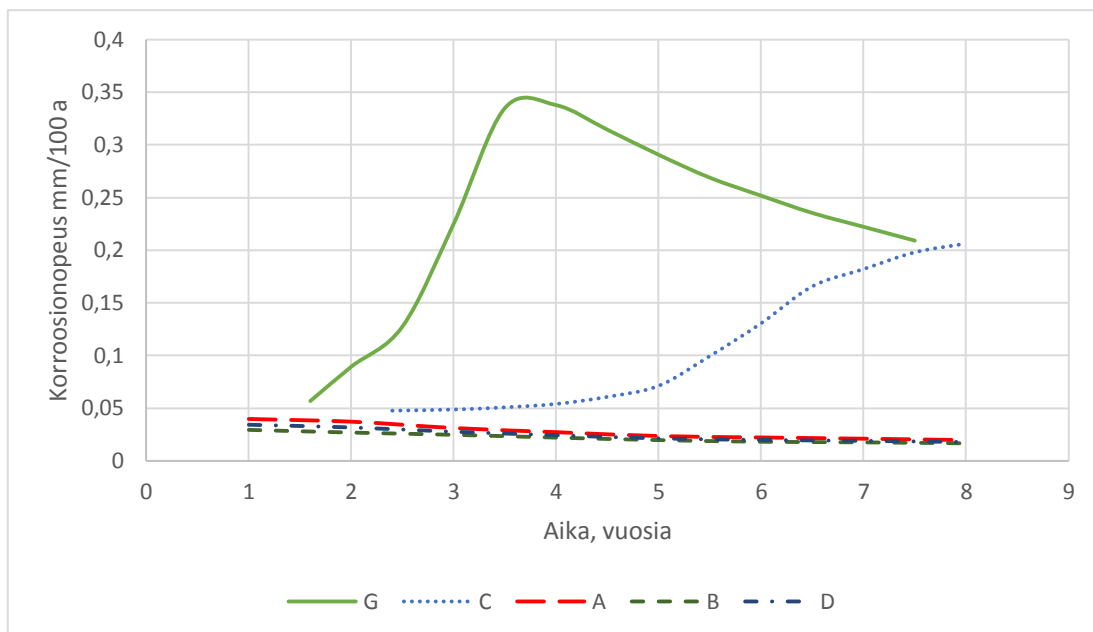


Näillä eri tutkimuspaikoilla tehtyjen korroosiokokeiden tulokset ovat esitettynä kuvassa 19. Tutkittu materiaali on ollut tarkemmin nimeämätön hiiliteräs ja tutkimusaika kahdeksan vuotta.



**Kuva 19.** Yhdysvalloissa hiiliteräkselle tehtyjen maaperäkorroosiokokeiden tulokset [38].

Korroosiomittausten tulosten yhdistäminen mitattuihin maaominaisuuksiin onnistui vain osittain. Kuvasta 19 näkyy, että tutkimuskohteiden G ja C maaperät ovat korroosion kannalta aggressiivisempia kuin muut tutkitut maaperät. Niillä oli myös matalimmat ominaisvastukset, jotka olivat usein jopa alle 5  $\Omega$ m. Vastaavasti tutkimuskohteet, joilla oli korkeampien ominaisvastus, olivat vähemmän syövyttäviä. Kun kuvan 19 massahäviöt muutetaan 100 vuoden aikana tapahtuvaksi paksuushäviöksi, näyttää tilanne kuitenkin aivan toiselta, kuten kuvasta 20 ilmenee.



**Kuva 20.** Kuvassa 19 esitetyt tulokset korroosionopeutena ilmaistuna.

Kuvan 20 perusteella korroosiot ovat varsin pieniä. Jopa tutkimuskohteen C savimaassa jäädyään kohtuullisiin arvoihin eli alle 1 mm korroosioon 100 vuoden ajalla.

Taulukossa 19 esitetyt redox-potentiaalit viittaisivat siihen, että tutkimuskohteessa C korroosio olisi vain lievää, mutta pisteessä N korroosio olisi merkittävää. Kuvan 19 tulosten mukaan näin ei kuitenkaan ollut. Tulosten varjolla todettiin, että redox-potentiaali on heikko mittari maaperässä tapahtuvalle korroosiolle.

Vastaavasti pH:ta oli vaikea yhdistää korroosionopeuteen. Happamimmat kohteet B ja C olivat kuvan 19 korroosiotuloksissa täysin erilaiset.

## 4. TÄYTEMAA

Luonnosta saatavien karkearakeisten hiekka- ja soramateriaalien lisäksi pohjarakennusohjeissa [36] listataan murskattuja kiviainesmateriaaleja ja kierrätys- tai uusiomateriaaleja. Pohjarakennusohjeet esittävät vaatimukseksi kierrätysmateriaaleille teknillisen soveltumisen lisäksi riittävän tasalaatuisuuden. Tavallisimmiksi kierrätysmateriaaleiksi nimetään metalliteollisuuden kuonista valmistetut tuotteet, betonimurske ja energiantuotannon sivutuotteena syntyvät tuhkat. Pohjarakennusohjeissa esitetään, ettei kierrätysmateriaalien käyttö saa aiheuttaa vaurioita, kuten korroosiota, niiden kanssa kosketuksiin tuleville rakenteille.

Teräspaalujen keskimääräiseksi korroosioksi tavanomaisissa olosuhteissa maan sisällä voidaan paalutusohjeen [43] mukaisesti arvioida 1,2 mm sadassa vuodessa paalun ulkopinnalta. Korrosio voidaan jättää huomioon ottamatta onttojen, kärjestä suljettujen tai betonilla täytettyjen paalujen sisäpinnoilla, sillä niissä korroosioreaktioissa kuluva happi loppuu nopeasti. Tavanomaisista poikkeavia tai aggressiivisia olosuhteita ovat esimerkiksi runsaasti rikkiä sisältävät maakerrokset, kaikki pilaantuneet maapohjat ja olosuhteet, joissa pohjavedenpinta vaihtelee ja siten hapen läsnäolo tarkasteltavassa maakerroksessa muuttuu.

Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia eurooppalaisia standardeja ja Eurokoodi 3 käsittelee teräsrakenteita [68]. Tässä Eurokoodissa listataan suuntaa-antavia arvoja teräspaalujen keskimääräiselle korroosiolle ja ne on esitetty taulukossa 20 [69].

**Taulukko 20.** Keskimääräinen korrosio suojaamattomille teräspaaluille maassa (mm) [69].

Maaperä tai täyttö	Tavoiteltu käyttöikä (vuosia)				
	5	25	50	75	100
Häiriintymätön luonnonmaa	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Saastunut luonnonmaa ja teollisuusalueiden maa-alueet	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Aggressiivinen luonnonmaa	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Tiivistämätön, ei-aggressiivinen kivennäismaatäyttö	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Tiivistämätön, aggressiivinen täyttö	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75

Taulukon 20 tiedoissa 5 ja 25 vuoden käyttöiän arvot perustuvat mittauksiin ja muut ovat näiden perusteella ekstrapoloituja. Lisäksi korroosionopeus on pienempi, jos täyttö on tiivistetty. Tällöin taulukon tiivistämätön ohjearvo voidaan jakaa kahdella [69].

Taulukon 20 häiriintymättömät luonnonmaat ja ei-aggressiiviset kivennäismaatäytöt sisältävät tyypilliset maalajit kuten hiekan, saven ja siltin. Aggressiivisiin luonnonmaihiin listataan suot, rämeet ja turvemaat ja aggressiivisia täyttöjä ovat tuhkat ja kuonat [69].

## 4.1 Tuhka

Palamisreaktiossa esimerkiksi lämmön ja sähkön tuotannossa polttoaineesta jäävää palamatonta epäorgaanista jäännöstä kutsutaan tuhkaksi [70]. Voimalaitosprosesseissa tuhka voidaan jakaa hiukkaskokonsa ja esiintymisensä mukaan pohjatuhkaan ja lentotuhkaan. Lentotuhka erotetaan savukaasuista sähköisten ja mekaanisten suodattimien avulla, kun taas pohjatuhka otetaan talteen palotilan pohjalta [45]. Lentotuhkaa esiintyy erityisesti pölypoltto- ja leijukerroskattiloissa [70].

Lentotuhka on aineksena hienompaa kuin pohjatuhka, joka palotilan korkea lämpötilan takia koostuu suuremmista yhteen liittyneistä rakeista. Esimerkiksi Helsingin voimalaitosten kivihiilituhkasta lentotuhka on rakeisuudeltaan pääasiassa siltin luokkaa, kun taas pohjatuhka vastaa kooltaan keskikokoista tai karkeaa hiekkaa [45].

Tuhkaa muodostavien ainesosien määrät ja koostumukset vaihtelevat huomattavasti eri polttoaineilla. Puupolttoaineissa näitä epäorgaanisia aineita voi olla selvästi alle yhden painoprosentin, kun taas joissain fossiilissa polttoaineissa kuten jotkut hiilet ja öljyliuskeet sisältävät tuhkaa jopa useita kymmeniä prosentteja kuiva-ainepitoisuudestaan.

### 4.1.1 Tuhkan ominaisuudet

Tuhkapitoisuus on tuhkan paino-osuus polttoaineen polton jälkeisestä kuiva-aineen painosta. Tuhkan koostumus on peräisin polttoaineen mineraalikoostumuksesta ja siitä on määritettävissä esimerkiksi yhdisteet kuten  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  ja  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Erilaisten kiinteiden polttoaineiden tuhkan koostumuksia on esitettynä taulukossa 21. Taulukossa 21 koivun tuhkalta on esitetty kahdet arvot, mutta näiden puupolttoaineiden eroa ei muuten täsmennetä lähteessä [71].

Polttolaitostuhkalle on löydetty erilaisia jälkikäyttötarkoituksia. Yleensä sitä käytetään täyteaineena maatyössä ja sementin valmistuksessa. Puu- ja turvepolttoaineiden tuhkaa voidaan käyttää myös lannoitteena [72; 73].

Maatyössä tuhkan käyttöä rajoittaa sen kemiallinen koostumus ja erityisesti sen sisältämät elolliselle ympäristölle haitalliset raskasmetallit kuten elohopea, kadmium ja lyijy. Ympäristöministeriön raportissa [72] on energiantuotannon tuhkien mahdollisiksi haittatekijöiksi ympäristökelpoisuuden puolesta nimetty As, Ba, Cr, Mo, Se, V, Zn, sulfaatit, pöly ja alkalisuus ja jätteen polton pohjatuhkien mahdollisiksi haittatekijöiksi Cu, Pb, Sb, Mo, Cr ja sulfaatit.

**Taulukko 21.** Joidenkin polttoaineiden tuhkan viitteellisiä koostumuksia [71].

Poltto- aine	Kemiallisen yhdisteen osuus painoprosentteina										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZnO
Koivu, 1	3,8			7,7	57,8	7,7	7,7	11,5	3,8		
Koivu, 2	0,9		1,3	14,9	46	11,6	8,6	15	2,6		
Mänty	4,6		5,5	1	42	16	3	15,2	4,5		
Kuusi	1		8,5	1	36,7	10	3,2	29,6	4,2		
Paju	0,43	0,3	0,2	4,8	30,8	5,1	0,3	26,5	2,1	0,02	
Turve	40- 75	1-16	4-7	2-4	1,5- 12	0,5- 2,5		0,1- 0,5		0,5- 1	
Turve, erotin	32- 51	6-29	10-36	1-13	6-17	1-4	1-3	1-7	0,4- 4	0,2- 0,5	
Kivihiili, keskiarvo	51	23	9,5	0,4	3,6	2,1	1,1	2	2,9	1	
Rengas- romu	30	5,8	0,3		1,8			1,4	6,6	0,8	48

Raskasmetallipitoisuuksille on säädetty enimmäismääriä. Maarakentamiskäytössä pätee niin sanottu MARA-asetus [74], joka määrittää kivihiilen, turpeen ja puuperäisen aineksen polton lento- ja pohjatuhkille haitallisten aineiden raja-arvot, kun näitä tuhkia käytetään kyseisen asetuksen mukaisiin rakennuskohteisiin kuten yleisten teiden tai pysäköintialueiden rakentamiseen. Raja-arvot on esitettyä taulukossa 22.

**Taulukko 22.** Tuhkien raskasmetallien raja-arvot MARA-asetuksessa [74].

	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Pb	Mo	V	Zn
<b>Pitoisuus (mg/kg)</b>	50	3000	15	400	400	300	50	400	2000

Elintarviketurvallisuusvirasto Evira on määrittänyt lannoitekäyttöön tarkoitettulle tuhkalta raskasmetallien enimmäisrajoitteet [73]. Nämä enimmäisraajat ovat esitettyä taulukossa 23.

**Taulukko 23.** Raskasmetallien enimmäisrajoitteet lannoitetuhkalle [73].

	As	Hg	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
<b>Pitoisuus metsäkäytössä (mg/kg)</b>	40	1	25	300	700	150	150	4500
<b>Pitoisuus muussa käytössä (mg/kg)</b>	25	1	2,5	300	600	100	100	1500

Taulukoita 22 ja 23 verrattaessa on syytä huomata, että MARA-asetuksessa elohopealle (Hg) ja nikkelille (Ni) ei ole ilmoitettu ollenkaan pitoisuuden raja-arvoa vaan ainoastaan raja-arvo näiden metallien liukoisuuden raja-arvot peitetyissä ja päällystetyissä rakenteissa.

Valtioneuvoston asetus 214/2007 eli niin sanottu PIMA-asetus määrittelee maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnin [75]. Tässä asetuksessa on määritetty myös kynnys- ja ohjearvoja eri metalleille. Nämä arvot on esitetty taulukossa 24. Taulukossa 24 esitetty luontainen pitoisuus on moreenin hienoaineksen luontaisen pitoisuuden mediaani.

**Taulukko 24.** *Maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arviointiin käytettävät metallipitoisuudet [75].*

	As	Hg	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Sb	V	Zn
<b>Luontainen pitoisuus (mg/kg)</b>	1	0,005	0,03	8	31	22	17	5	0,02	38	31
<b>Kynnysarvo (mg/kg)</b>	5	0,5	1	20	100	100	50	60	2	100	200
<b>Alempi ohjearvo (mg/kg)</b>	50	2	10	100	200	150	100	200	10	150	250
<b>Ylempi ohjearvo (mg/kg)</b>	100	5	20	250	300	200	150	750	50	250	400

Suomen ympäristökeskus SYKE on listannut sosiaali- ja terveysministeriön kemikaalien luokitusperusteiden ja vaarallisten aineiden luettelon perusteella ohjeellisia vaarallisten jätteiden raja-arvoja metalleille [76]. Osa niistä on esitettyinä taulukossa 25. Osa listatuista arvoista perustuu metallien helppoliukoisten suolojen tietoihin, sillä suoraa arvoa metalli-ionille ei ole ollut.

**Taulukko 25.** *Vaarallisen jätteen raja-arvoja [76].*

	As	Hg	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Sb	Zn
<b>Vaarallisen jätteen raja-arvo (mg/kg)</b>	1000	1000	1000	1000	2500	1000	2500	2500	2500

Edellä esitettyjen raskasmetallien pitoisuusrajoitteita voidaan verrata tuhkatietoihin. Raskasmetallipitoisuudet eräiden polttoaineiden tuhkissa on esitettyinä taulukossa 26.

**Taulukko 26.** Raskasmetallipitoisuuksia pohjatuhkassa [71].

Polttoaine	Pitoisuus (mg/kg)					
	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
PE-pakkausjätteestä koostuva polttoaine	260	1460	700	120	160	560
PET-pakkausjätteestä koostuva polttoaine	230	900	780	100	140	590
Ekoroskin toimittama pakkausjätteestä koostuva polttoaine	270	1190	840	100	390	1170
Ab Stormossen Oy:n toimittama jätteestä erotettu polttoaine	820	4470	790	180	500	1150
Puu (pohjatuhka)	60	15-300	2500-5500	40-250	15-60	15-1000
Puu (lentotuhka)	40-250	200	6000-9000	20-100	40-1000	40-700
Turve	40-130	60-160	800-2300	30-700	75-970	<20-540

#### 4.1.2 Kyläsaaren ympärille läjitetty tuhka

Kyläsaaren polttolaitoksen tuottaman kuonan koostumusta on selvitetty yksittäismittauksilla jo 1980-luvun alussa [77]. Näiden mittausten tulokset on esitetty taulukossa 27.

**Taulukko 27.** Kyläsaaren polttolaitoksen tuottaman kuonan raskasmetallipitoisuudet [77].

Raskasmetalli	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Keskiarvo (mg/kg)	12,6	24	84	1278	86	2983	4700
Keskihajonta (mg/kg)	2	2	6	273	19	728	1106

Taulukosta 27 nähdään, että Kyläsaaren polttolaitoksen tuottaman kuonan kromi, nikkeli ja kuparipitoisuudet ovat samaa suuruusluokkaa tai hieman alhaisempia kuin taulukossa 26 esitettyjen jätepolttoaineiden vastaavat arvot. Sen sijaan Kyläsaaren polttolaitoksen kuonassa on huomattavasti korkeampi lyijy- ja sinkkipitoisuus kuin taulukon 26 jätepolttoaineilla. Kuonan kupari-, lyijy- ja sinkkipitoisuus ylittävät taulukossa 22 esitetyt MARA-asetuksen raja-arvot ja taulukossa 24 esitetyt PIMA-asetuksen ylemmät ohjearvot. Lyijy- ja sinkkipitoisuuden suhteen ylittyy myös taulukon 25 vaarallisen jätteen raja-arvot.

Kyläsaaren polttolaitoksen kuonan pH oli viidessä mittauksessa kuudesta 8,1-8,5 ja keran 10,1. Kuonan sähkönjohtavuus vaihteli mittauksissa 55-380 mS/m välillä keskiarvon ollessa 198 mS/m [77]. Ominaisvastusarvoina esitettyä vaihteluväliä on 2,6-18,2  $\Omega$ m ja keskiarvo on 5,0  $\Omega$ m. Kuten aiemmissa luvuissa on todettu, nämä arvot viittaavat korroosion kannalta hyvin aggressiiviseen ympäristöön.

## 5. PAALUMATERIAALIT

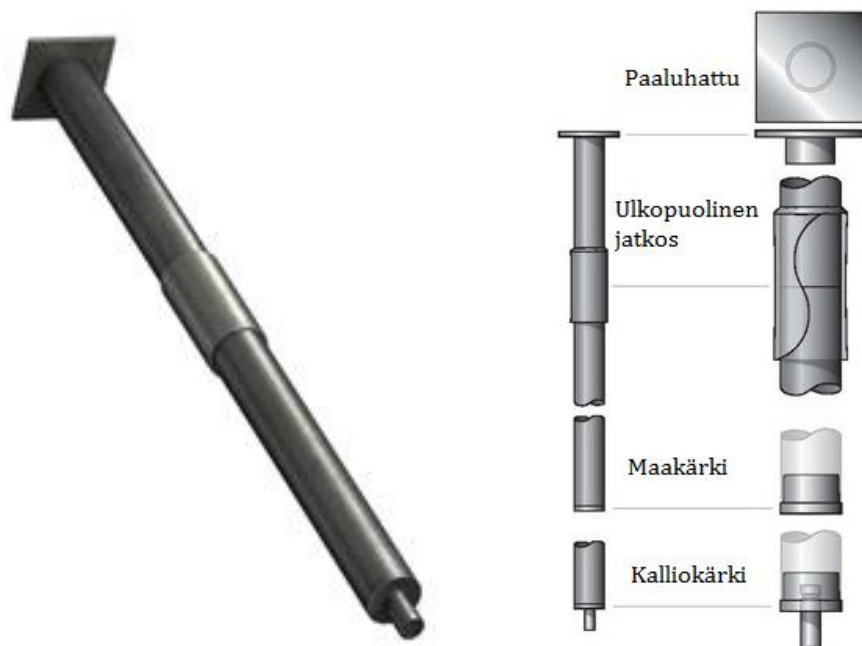
Pohjarakentamiseen käytetyt paalut voidaan jakaa paalutusohjeen [43] mukaisesti maata syrjäyttäviin ja syrjäyttämättömiin paaluihin. Suomessa yleisimpiä maata syrjäyttäviä paalutyyppejä ovat lyöntipaalut, jotka voivat olla teräsbetonia, terästä tai puuta. Teräksiset lyöntipaalut jaetaan halkaisijan mukaan pienpaaluihin, jotka ovat halkaisijaltaan alle 300 mm ja suurpaaluihin, jotka ovat halkaisijaltaan 300 mm tai suurempia [43].

Paaluja voidaan asentaa esimerkiksi lyömällä, täryttämällä, poraamalla ja puristamalla. Tässä maaperäkorroosiotutkimuksessa käytetyt paalut kuuluvat paalutusohjeen mukaisesti lyötäviin pienpaaluihin [43]. Lyötävät pienpaalut asennetaan hydraulijärkäleen, pudotusjärkäleen, paineilmavasaran, hydraulivasaran tai täryttimen avulla tukipaaluiksi joko kallioon tai tiiviiseen maakerrokseen [78].

Teräsputkipaalujen pinnoittaminen korroosiota vastaan ei ole tämän työn keskeisin tutkimuskohde, mutta työn kokonaisuuden kannalta sitä käsitellään tässä luvussa, sillä työn kokeellisessa osuudessa osan putkipaalujen pinnasta maalattiin epoksimaalilla.

### 5.1 Teräspaalut

Tässä työssä käytetyt paalut ovat SSAB-konserniin kuuluvan Ruukki Constructionin lyötäviä RRs-teräspaaluja. Kuvassa 21 on esitettyä 3D-piirroksena teräsputkipaalu ja ni-  
metty sen eri osat.



**Kuva 21.** Teräsputkipaalun 3D-mallikuva ja paalun eri osat [79].



Kuvasta 21 käy ilmi putkipaalin eri osat: paalukärki, pituussaumahitsatusta teräspuutket, ulkopuolinen kitkaan perustuva jatkos ja paaluhattu. Alimpana kuvassa on paalin kärki, joka edellä paalu lyödään maahan. Paalin kärki suojataan joko maa- tai kalliokärjellä. Yleisin tyyppi on maakärki. Kärkikappaleet kiinnittyvät paaluun kitkan välityksellä.

Kalliokärjen kärkitappi on varsinaista paalua kapeampi lieriökappale, joka valmistetaan karkaistusta erikoisteräksestä ja jolla varmistetaan hyvä tunkeutumiskyky kallioon. Tässä työssä paaluissa käytettiin kalliokärkeä, sillä paalutettavan kohteen maaperä sisältää sekalaista läjitystä ja muun muassa suurehkoja kiviä ja rakennusjätettä.

Teräspuutkien välissä on ulkopuolinen jatkos. RRs-paaluissa käytetään kitkaan perustuvia jatkoksia, jotka täyttävät Eurokoodi 3 kansallisen liitteen jäykkäjatkoksille asetetut vaatimukset. Tutkituissa paaluelementeissä jatkos oli aina ulkopuolinen kaksoiskartioitu holkki-jatkos. Ulkopuolisen jatkoksen paikoillaan pysyminen lyönnin aikana varmistetaan hitsillä, joka tehdään tehtaalla jatkoksen kiinnittämisen yhteydessä.

Kuten kuvasta 21 käy ilmi, jatkos on halkaisijamitoiltaan suurempi kuin paalussa käytettävät putket. Teräspuutkea ja siihen liitettyä jatkosta kutsutaan paaluelementiksi ja esimerkiksi 12 m pitkä paalu voi koostua kahdesta 6 m paaluelementistä tai yhdestä 12 m elementistä.

Ylimpänä kuvassa 21 on esitettynä paaluhattu. Paaluhattu on teräslevy, jonka avulla ylärakenteiden kuormat siirretään paalulle. Tässä työssä paaluihin ei asennettu paaluhattua, vaan sen sijaan niiden yläpäät hitsattiin umpeen ruostumattomasta teräksestä tehdyillä pyöreillä levyillä. Näihin levyihin hitsattiin myös paalujen tunnistenumerot.

Työssä tutkitut paalut ovat Ruukin RRs140/8-paaluja. RRs on tuotemerkkilyhenne tarkoittaen S550J2H-teräksestä tehtyä paalua. Valmistajan ilmoittamat tiedot näille paaluille ovat esitettynä taulukossa 28. Esitetyt dimensiot ovat nimellismittoja.

**Taulukko 28.** Ruukin RRs140/8-teräspuutkipaalin tekniset tiedot [79].

Halkaisija D (mm)	139,7
Seinämän paksuus t (mm)	8
Pituusmassa M (kg/m)	26
Teräspoikkileikkauksen pinta-ala A (mm <sup>2</sup> )	3310
Paalin vaipan pinta-ala A <sub>v</sub> (mm <sup>2</sup> )	0,44
Paalin kärjen pinta-ala A <sub>b</sub> (mm <sup>2</sup> )	15328
Taivutusvastus W <sub>el</sub> (cm <sup>3</sup> )	103,1
Taivutusjäykkyys EI (kNm <sup>2</sup> )	1513
Poikkileikkausala 1,2 mm korroosiovähennyksen jälkeen A <sub>1,2</sub> (mm <sup>2</sup> )	2788
Taivutusjäykkyys 1,2 mm korroosiovähennyksen jälkeen EI <sub>1,2</sub> (kNm <sup>2</sup> )	1250
Poikkileikkausala 2,0 mm korroosiovähennyksen jälkeen A <sub>2,0</sub> (mm <sup>2</sup> )	2445
Taivutusjäykkyys 2,0 mm korroosiovähennyksen jälkeen EI <sub>2,0</sub> (kNm <sup>2</sup> )	1082

Näiden teräsputkipaalujen toleranssitiedot on esitetty taulukossa 29 ja toleranssitietojen perusteella lasketut eri mittojen vaihteluvälit taulukossa 30.

**Taulukko 29.** *Teräsputkipaalujen toleranssit tietyille mitoille käytetyissä paaluissa*

Ominaisuus	Toleranssi SFS-EN 10219-2 -standardin mukaan
Halkaisija D	$\pm 1 \%$ , kuitenkin vähintään $\pm 0,5$ mm ja enintään $\pm 10$ mm
Seinämän paksuus t	$-5 \%$ / $+10 \%$ , vähintään $\pm 0,2$ mm ja enintään $\pm 0,5$ mm
Pituusmassa M	$\pm 6 \%$ yksittäisellä rakenneputkella

**Taulukko 30.** *140/8-teräsputkipaalujen mittojen vaihteluvälit SFS-EN 10219-2 -standardin mukaan laskettuna*

Ominaisuus	Vaihteluväli
Halkaisija D	138,3 – 141,1 mm
Seinämän paksuus t	7,6 – 8,8 mm
Pituusmassa M	24,4 – 27,6 kg

Taulukoissa 29 ja 30 esitetyt seinämäpaksuuden toleranssiarvot ovat alarajaltaan tiukemmat kuin standardin SFS-EN 10219-2 vaatimat [80; 81].

### 5.1.1 Rakenneteräket S355J2H, S440J2H ja S550J2H

Eurooppalaiset kuumavalssatut rakenneteräket määritellään SFS-EN 10025 -standardin osissa 2-5 niiden seosainepitoisuuksien, mekaanisten ominaisuuksien ja lämpökäsittelyjen mukaan [82-85]. SFS-EN 10025-2 on määritelty niiden rakenneterästen seosainepitoisuudet ja mekaaniset ominaisuudet [82], jotka määritellään standardin SFS-EN 10020 mukaan seostamattomiksi teräksiksi. Seostamattomat teräket ovat teräksiä, joiden koostumuksessa minkään seosaineen pitoisuus ei ylitä kyseisessä standardissa määriteltyjä raja-arvoja [86].

Rakenneteräksen lujuutta voidaan parantaa muokkauslujittamalla, pienentämällä raekokoa, liuoslujittamalla ja erkaumalujittamalla. Seostamattomien rakenneterästen tapauksessa merkittävimmät tavat lisätä lujuutta ovat liuoslujitus ja erkaumalujitus.

Kun metallin joukkoon seostetaan jotain toista alkuainetta tarkoituksena luoda lujempi seos, puhutaan liuoslujituksesta. Seosaineet sijoittuvat hilarakenteessa koostaan riippuen joko väli- tai korvaussijaan. Teräksissä välisijaan liukenevat hiili ja typpi ovat tyypillisiä lujittajia. Väli- ja korvaussija-atomit aiheuttavat sisäisiä jännityskenttiä, jotka estävät dislokaatioliikettä johtaen lujittumiseen. Dislokaatiot ovat viivamaisia kidevirheitä, joita esiintyy kiteisissä materiaaleissa, kuten metalleissa.

Erkaumalujituksella puolestaan tarkoitetaan lujitustapaa, jossa edellä mainittu dislokaatioliikkeen estäminen tapahtuu erkaumien avulla. Nämä ovat metallimatriisiin lämpökäsittelyiden avulla erkautettuja karbideja tai nitridejä.

Työssä käytettiin standardin SFS-EN 10219-1 mukaisesta S550J2H-rakenneteräksestä tehtyjä putkipaaluja. Muita esitettyjä vaihtoehtoja paalumateriaaliksi olivat S355J2H- ja S440J2H-rakenneteräket. Näiden terästen koostumus on esitettynä taulukossa 31 ja mekaaniset ominaisuudet taulukossa 32.

**Taulukko 31.** Paaluissa käytettävien rakenneterästen koostumus [80].

Teräslaji	Hiiliäkvivalentti	Kemiallinen koostumus, max.			
	CEV (%)	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
S355J2H	0,45	0,22	1,6	0,03	0,03
S440J2H	0,45	0,16	1,6	0,02	0,02
S550J2H	0,47	0,12	1,9	0,02	0,02

Taulukossa 31 esitetty S355J2H-rakenneteräksen koostumus vastaa standardissa SFS-EN 10025 osassa 2 määritettyä pitkän tuotteen koostumusta. S440J2H- ja S550J2H-terästä ei ole määritetty SFS-EN 10025 -standardissa.

**Taulukko 32.** Paaluissa käytettävien rakenneterästen mekaaniset ominaisuudet [80].

Teräslaji	Myötölujuuden vähimmäisarvo $f_y$ min (MPa)	Murtolujuus $f_u$ (MPa)	Murtovenymä $A_5$ min (%)	Iskusitkeys	
				Testauslämpötila T (°C)	Vähimmäisarvo KV min (J)
S355J2H	355	470-630	20	-20	27
S440J2H	440	490-630	17	-20	27
S550J2H	550	605-760	14	-20	27

Standardin SFS-EN 10219-1 mukaisesti taulukon 4 myötölujuus- ja iskusitkeystiedot ilmenevät rakenneteräksisten putkien nimikkeestä. Esimerkiksi merkinnässä S355J2H S-kirjain tarkoittaa rakenneterästä, 355 myötölujuuden vähimmäisarvoa (MPa) ainepaksuudella  $\leq 16$  mm, J2 vähimmäisiskusitkeyden 27 J testaamista -20 °C lämpötilassa ja H rakenneputkea.

## 5.2 Paalujen pinnoitus

Metalleja voidaan suojata korroosioreaktioita vastaan useilla eri tavoilla. Eräs tapa suojata teräspintaa ympäristön aiheuttamalta korroosiolta on pinnoittaa se käyttöympäristöön soveltuvalla pinnoitteella. Muita tapoja suojata korroosiolta on esimerkiksi sähköinen

suojaaminen. Suojaamiskeinojen on tarkoitus vaikuttaa sähkökemiallisiin korroosioilmiöihin, joko muuttamalla tapahtuvia reaktioita tai estämällä reaktioihin liittyvä sähkövirran kulku ja siten korroosiokennon syntyminen.

Teräspaalujen asentaminen maahan aiheuttaa selvän riskin paaluihin tehdyille pinnoitteelle. Paaluja maahan juntattaessa niiden ulkopinta altistuu mekaaniselle kulutukselle ja maaperässä oleva teräväreunainen kiviaines voi lastuta pehmeämpää pintaa pois.

### 5.2.1 Sinkkipohjaiset pinnoitteet

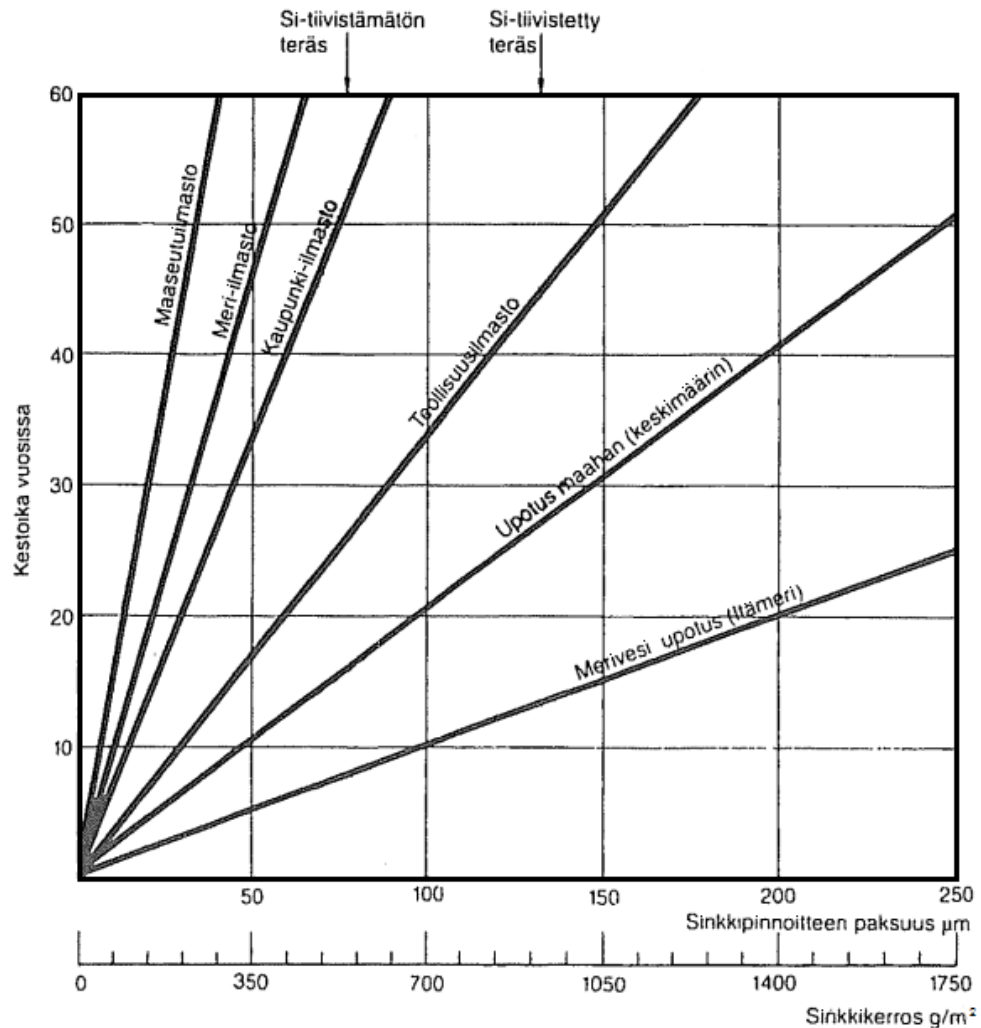
Sinkkipinnoitteet suojaavat terästä korroosiota vastaan muodostamalla kerroksen, joka estää kosteuden ja hapen pääsyn teräksen pinnalle, ja antamalla katodisen suojan esimerkiksi naarmujen ja kolhiintumien kohdalle [87]. Katodinen suoja perustuu juuri sinkin galvaanisten sarjojen mukaiseen epäjalouteen teräkseen nähden eli hallittuun galvaaniseen korroosiopariin.

Sinkki on epäjalo metalli, jolla on suuri taipumus syöpymiseen. Kun sinkitty esine joutuu ilmastorasitukseen, yhtyy ilman happi välittömästi sinkkipinnoitteeseen ja siihen muodostuu äärimmäisen ohut sinkkioksidikalvo ( $\text{ZnO}$ ). Ulkoilmassa sinkkioksidi muuttuu ilman kosteuden vaikutuksesta sinkkihydroksidiksi ( $\text{Zn(OH)}_2$ ) ja edelleen ilman hiilidioksidin vaikutuksesta emäksiseksi sinkkikarbonaatiksi ( $2 \text{ZnCO}_3 \cdot 3 \text{Zn(OH)}_2$ ). Muodostunut kerros on tiivis, hyvin kiinnittynyt, melkein liukenematon veteen ja antaa siten sinkkipinnoitteelle hyvän suojan hidastaen syöpymisnopeutta.

Sinkin syöpymisnopeuteen vaikuttavat monet tekijät. Esimerkiksi erilaiset rikkiyhdisteet yhdessä kosteuden kanssa muuttavat muutoin tiiviit ja korroosiota kestävät sinkkikarbonaatti- ja sinkkioksidikerrokset sinkkisulfaateiksi ja -sulfiiteiksi, jotka ovat vesiliukoisia ja pysyvät huonosti kiinni sinkin pinnassa. Ne voivat huuhtoutua pois paljastaen puhdasta aktiivista sinkkipintaa ja jatkaen korroosioreaktiota.

Sinkin syöpymisnopeudella ei voidakaan antaa mitään yleispätevää kaavaa. Pitkäaikaisen korroosiokokeiden perusteella voidaan kuitenkin melko tarkkaan arvioida sinkkipinnoitteen tuleva kestoikä. Kuvassa 22 on esitettynä arviota sinkkipinnoitteiden kestosta eri ympäristöolosuhteissa. Kuvan 22 tulokset perustuvat Suomessa vuosina 1975-1979 tehtyihin korroosiokokeisiin.

Kuten kuvasta 22 käy ilmi, sinkkipinnoitteen kestoikä on suoraan verrannollinen pinnoitteen paksuuteen. Vastaavanlaisia kestoikiä on mitattu myös muualla maailmassa, mutta tulokset vaihtelevat luonnollisesti hieman [88].

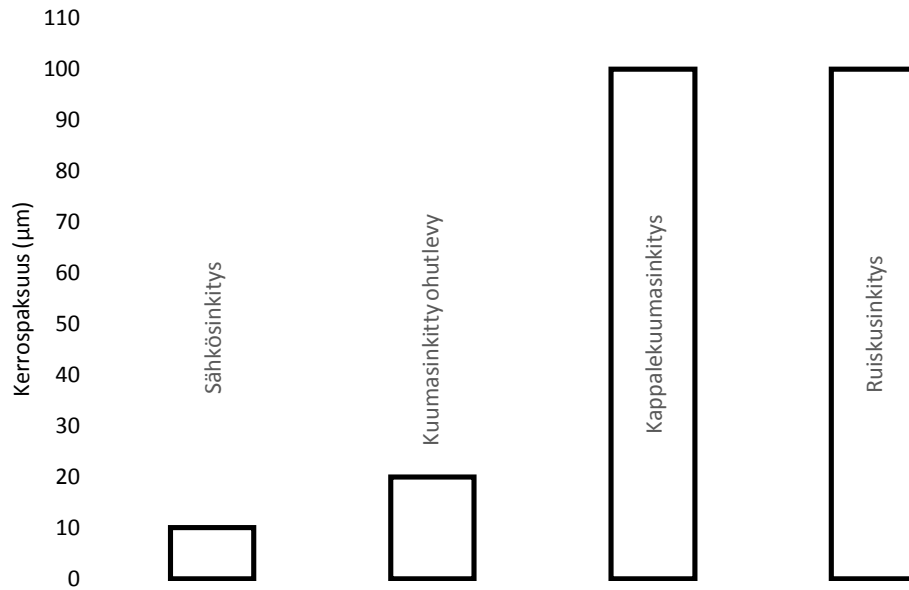


**Kuva 22.** Sinkkipinnoitteen kestoikä eri ympäristöolosuhteissa [87]. Ilmoitettu sinkkipinnoitteen paksuus on sinkin yhteenlaskettu määrä kappaleen molemmin puolin.

Sinkitys voidaan tehdä usealla eri menetelmällä ja erilaisilla sinkitystavoilla on saavutettavissa eri pinnoitepaksuudet. Sinkitysmenetelmiä ovat kuumasinkitys, ruiskusinkitys, sähkösinkitys, mekaaninen sinkitys ja sherardisointi [87].

Sherardisoinnissa pinnoitettavat tuotteet lämmitetään yhdessä sherardisoivan sinkkipölyä sisältävän seoksen kanssa hitaasti pyörivässä säiliössä. Prosessissa vallitseva lämpötila on  $300^{\circ}\text{C}$ - $500^{\circ}\text{C}$ , mutta normaalisti se on alle sinkin sulamispisteen  $419^{\circ}\text{C}$ . Pinnoitepaksuutta voidaan hallita lämpötilan lisäksi sinkkipölyn määrällä ja prosessiajalla. Sherardoinnin aikana muodostuu tasainen  $10\mu\text{m}$ - $75\mu\text{m}$  sinkkirautakerros pinnoitettavan tuotteen päälle [89]. Mekaanista sinkitystä ja sherardisointia ei käytetä Suomessa [90].

Kuvassa 23 on esitetty eräitä tyypillisiä pinnoitepaksuuksia Suomessa käytetyille eri sinkitysmenetelmille. Menetelmän valintaan vaikuttavat esimerkiksi kappaleen koko ja muoto, halutut korroosionkesto-ominaisuudet ja eri menetelmien hinta toisiinsa nähden.



**Kuva 23.** Eri sinkitysmenetelmillä saatavia keskimääräisiä sinkkikerrospaksuuksia yhdelle puolelle pinnoitettavaa kappaletta [90].

Kuumasinkitys on menetelmistä Suomessa ylivoimaisesti käytetyin. Kappalekuumasinkityksessä puhdistetut kappaleet upotetaan sulaan sinkkiin ja teräksen pinnalle muodostuu 50-150 µm kerros, jossa on rauta-sinkkiyhdisteitä sekä puhdasta sinkkiä [87; 90]. Ohutlevyt kuumasinkitetään jatkuvatoimisilla tuotantolinjoilla ja tällöin tyypillisesti sinkkikerros on ohuempi 100-450 g/m<sup>2</sup> [91] vastaten 7-33 µm kerrospaksuutta per sinkitty puoli. Erikoistoimisesti on mahdollista saada pinnoitteen paksuudeksi jopa 1000 g/m<sup>2</sup> eli 70 µm/puoli [92].

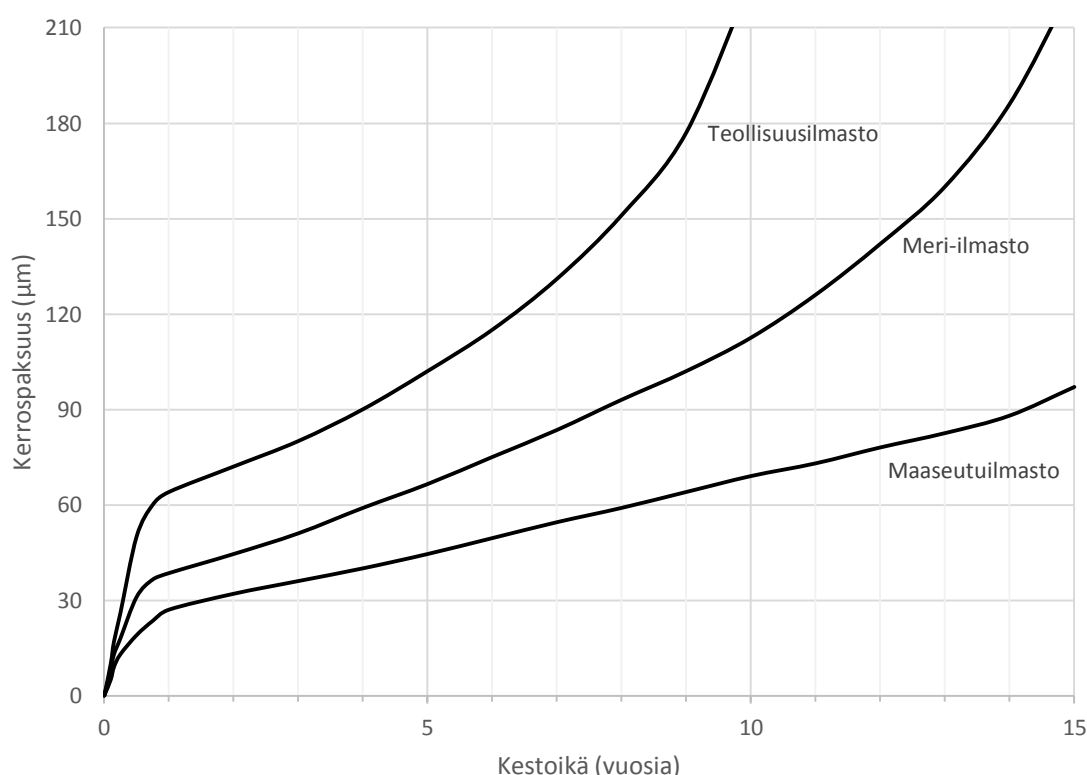
Sähkösinkityksessä esikäsitellyt teräskappaleet upotetaan sinkkisuolaliuokseen ja kytketään tasavirtalähteeseen. Sähköparin anodina on puhdasta sinkkiä ja sähkövirran ollessa päällä sinkkiä saostuu teräskappaleen pinnalle elektrolyytistä samalla, kun sitä liukenee anodikappaleesta liuokseen. Sähkösinkityksessä sinkkikerros on normaalisti vain 5-15 µm paksu ja menetelmä soveltuu pääasiassa pienille kappaleille, jotka eivät ole kovin syövyttävissä olosuhteissa, kuten sisätiloissa [87; 90].

Ruiskusinkityksessä sulatettu sinkki puhalletaan paineilmalla suihkupuhdistetun teräksen pinnalle. Sinkitykseen käytetään joko kaasua- tai valokaariruiskua ja sinkkiraaka-aine syötetään yleensä lankana. Menetelmän avulla muodostuu hieman huokoinen ja karhea sinkkipinnoite, jonka paksuus on säädeltävissä noin 30 µm aina noin 200-300 µm [87; 90]. Yleensä ruiskusinkitystä käytetään, kun kuumasinkitys ei ole mahdollinen esimerkiksi suuresta kappalekoosta johtuen [87].

## 5.2.2 Maalit

Maali on maalausmenetelmin alustalle ohueksi kerrokseksi levitettävä nestemäinen tai jauhemainen tuote, joka kuivuessaan muodostaa kiinteän maalikalvon. Teräksen ja muiden metallien suojaukseen käytettäviä maaleja sanotaan korroosionestomaaleiksi [90; 93; 94]. Kalvopaksuus maaleilla on suuruusluokkaa 100-500  $\mu\text{m}$  ja poikkeustapauksissa 500-1000  $\mu\text{m}$  [93].

Kuten sinkkipinnoitteet, myös maalipinnoitteen korroosionesto on verrannollinen kerrospaksuuteen. Kuvassa 24 on esitettyä arvioita riittävästä korroosionestomaalauksen kerrospaksuudesta eri ilmastoympäristöissä.



**Kuva 24.** Arvio teräspinnan korroosionestoon käytettävän maalipinnoitteen kestoiästä eri ympäristöolosuhteissa, muokattu lähteestä [90].

Sideaine on maalin tärkein komponentti muodostaen maalattavaan alustaan kiinnittyvän kalvon. Sideaineet ovat yleensä orgaanisia, suurimolekyyllisiä polymeerejä tai reaktiokykisiä pienimolekyyllisiä lakkahartseja [93; 94]. Sideaine määrittää maalikalvon ominaisuudet kuten kuivumistavan ja kemialliset ominaisuudet ja korroosionestomaalit jaetaan yleensä sideaineen perusteella eri maalityyppeihin [90; 93; 94]. Maalien jako kuivumistavan ja liuotteen perusteella on esitettyä liitteessä 1.

Maalauksen avulla saavutettu korroosionesto perustuu anodisen tai katodisen reaktion pysäyttämiseen tai sähkövirran kulun rajoittamiseen korroosioparin ympärillä vaikuttavassa elektrolyytissä. Vastusinhiboinnin toteutumiseksi maalikalvon pitää muodostaa riittävän suuri vastus sähkövirran kululle. Veden ja maan alle joutuviissa rakenteissa päästään parhaisiin tuloksiin tällaisella maalien käytöllä [94].

Maalausjärjestelmä muodostuu esikäsittelystä ja pinnan suojaukseen käytettyjen maalien muodostamasta maalikalvosta. Maalausjärjestelmään voi kuulua yksi tai useampi maali ja maalauskerroksia voi olla yksi tai useampi [90].

Standardissa SFS 5873 upotusrasituksen alaisille teräspinnoille nimetään maalausjärjestelmäksi EP500/1-FeSa2½ tai EP500/2-FeSa2½. Tämä standardi on yhteneväinen standardin SFS-EN ISO 12944-5 tietojen kanssa [95]. Standardia SFS 5873 edeltänyt standardi SFS 4962 nimesi maahan upotettavien teräspintojen maalausjärjestelmäksi ET400/4-FeSa2½.

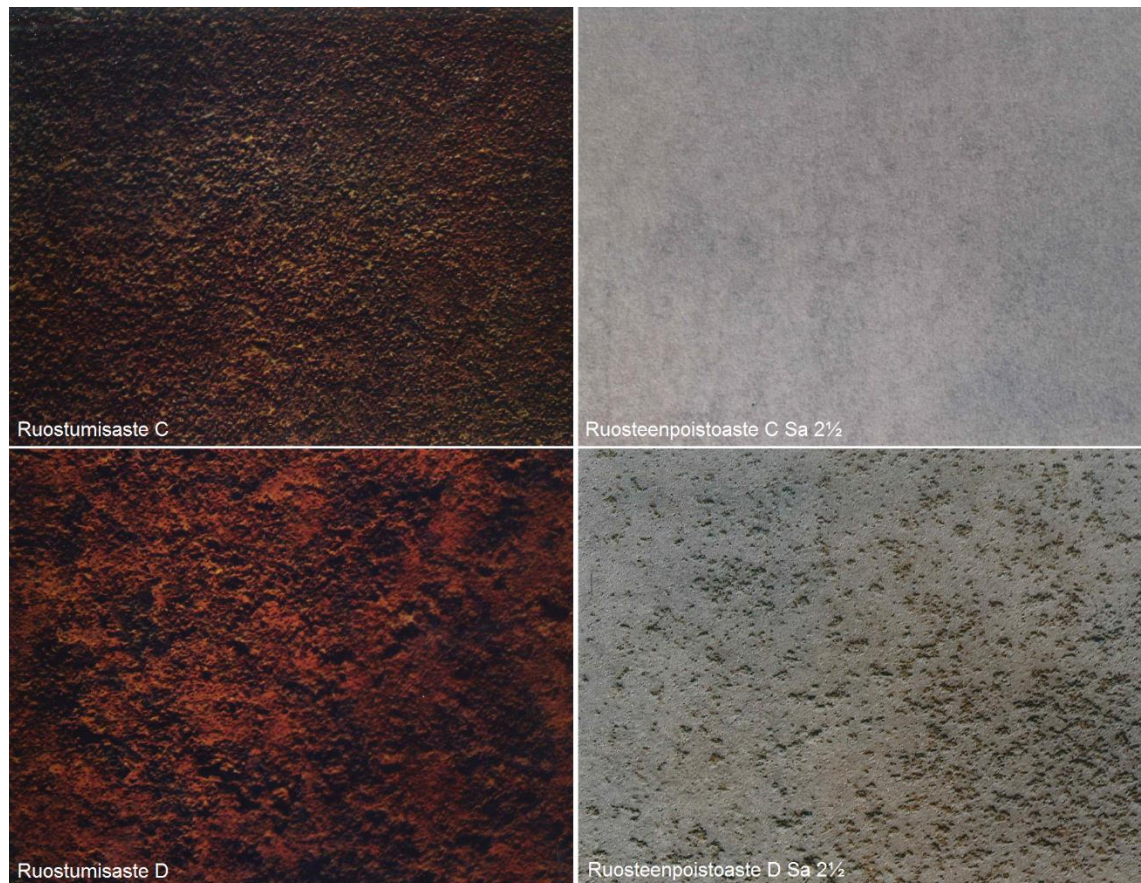
Molemmissa edellä mainituissa maalausjärjestelmissä FeSa2½ tarkoittaa teräspintaa, jolle tehdään standardin SFS-EN ISO 8501-1 mukainen hyvin huolellinen suihkupuhdistus. Tämä standardi määrittelee sanallisesti ja esimerkkikuvilla teräspintojen ruostumisasteet luokkiin A-D [96], joista D-luokassa pinnalta silmämääräisesti havaittu korroosio on edennyt pisimmälle, ja suihkupuhdistuksen luokkiin Sa 1, Sa 2, Sa 2½ ja Sa 3 [96], joista Sa 1 on kevyin suihkupuhdistus ja Sa 3 on perusteellisin suihkupuhdistus.

Suihkupuhdistuksessa valssihilse, ruoste ja vieraat partikkelit poistetaan siten, että niistä jää jäljelle ainoastaan heikkoja varjostumia tai juovia, ja pinnat puhdistetaan pölynimurilla, paineilmapuhalluksella tai harjaamalla. Kuvassa 25 on esitettynä vertailu kahden eri ruostumisastetta olevan teräspinnan ja Sa 2½ -tilaan suihkupuhdistetun teräspinnan kesken. Kuvan 25 teräspinnat ovat mainitun ISO 8501-1-standardin verrokkikuvia.

Maalausjärjestelmissä EP tarkoittaa sideaineen olevan epoksia. Merkintä EP sisältää myös modifioitua epoksia eli epoksikombinaatit (EPC) ja lasikuituvahvisteiset epoksinpinnoitteet (EPGF) [95]. Vanhan standardin SFS 4962 maalausjärjestelmän ET tarkoittaa epoksitervamaalia ja lukeutuukin siis standardin SFS 5873 mukaisiin epoksikombinaatioihin. Epoksitervamaalit ovat kaksikomponenttisia reaktiomaaleja, joissa sideaineen epoksiin on sekoitettu kivihiilitervaa, joka jakautuu homogeenisesti kuivuessa muodostuvaan epoksiverkkoon [93].

Maalausjärjestelmissä esitetty lukuarvo kertoo maalikerroksen nimellispaksuuden ja kerrosmäärän. Esimerkiksi 500/2 tarkoittaa, että kuivakalvon 500 µm nimellispaksuus saavutetaan maalaamalla kaksi 250 µm kerrosta.





**Kuva 25.** Standardissa SFS-EN ISO 8501-1 kuvaillut ruostumisasteet C ja D ja näiden ruosteenpoistoasteet C Sa 2½ ja D Sa 2½, muokattu lähteestä [97].

### 5.2.3 Kivihiilitervapohjaiset pinnoitteet

Kivihiilitervaa on käytetty modifioivana komponenttina useissa eri maalipinnoitteissa. Näitä ovat aikaisemmin mainittujen epoksitervamaalien lisäksi esimerkiksi vinyylitervat ja polyuretaanitervamaalit.

Vinyylitervassa kivihiilitervapiki on seostettuna vinyylikloridin kopolymeerien joukkoon muodostaen sideaineena. Vastaavasti polyuretaanitervamaaleissa kivihiilitervalla on muokattu kaksi komponenttista polyuretaanimaalia, jonka muoviosa on hydroksyyli-ryhmiä sisältävää hartsia eli polyolia (akryyli-, polyesteri- tai epoksihartsi) ja kovetteena on joko aromaattista tai alifaattista isosyanaattiyhdistettä [93; 98].

Kivihiilitervalla modifioituja pinnoitteita on tyypillisesti käytetty upotusrasituksissa maan- ja vedenalaisissa kohteissa ja rakenteissa [93; 98]. Suomessa niitä on käytetty esimerkiksi siltojen eri osissa [98].

Kivihiilitervaa sisältävissä pinnoitteissa tervan osuus voi olla suuri ja tästä johtuen myös näihin tuotteisiin liittyvät terveysvaikutukset ovat vakavat [99; 100]. Kivihiilitervapiki on

määritelty karsinogeeniseksi ja tämä on ollut syynä muun muassa sen käytön lopettamiseen asfaltoinnissa ympäri Eurooppaa [101].

### 5.2.4 Komposiittipinnoitteet

Komposiittipinnoitteet ovat nykyisin yksi vaihtoehto korvaamaan perinteiset maalit ja pinnoitteet korkeammalla kestoikällään. Maahan asennettaviin putkistoihin soveltuvissa komposiittipinnoitteissa sideaineena on muokattu epoksi ja lujitteena hienojakeisia ke-raamisia aineita, kuten piikarbidia, piidioksidia ja titaanioksidia, suojaten rakennetta pa-remmin korroosiota, eroosiota ja abrasiivista kulumista vastaan [102-105].

Komposiittipinnoitteiden levitys tehdään esimerkiksi ruiskuttamalla tai telalevityksenä riippuen käytettävästä tuotteesta ja pinnoitettavasta kohteesta. Vastaavasti kerrospaksuus vaihtelee käyttökohteen ja tuotteen mukaan, mutta vähimmäispaksuus on noin 400 µm [106; 107].

### 5.2.5 Kaasu- ja öljyputkissa käytetyt pinnoitteet

Standardi ISO 13623 määrittelee yleiset vaatimukset kaasu- ja öljyputkijärjestelmille. Putken ulkopuolisen korroosion riskikartoitusta varten pitää standardin mukaan tehdä maaperäselvitys, joka ottaa huomioon muun muassa ominaisvastuksen, suola- ja happi-pitoisuuden, bakteerien aktiivisuuden ja maaperän saastumisen.

ISO 13623 määrittää, että metalliset kaasu- ja öljyputket täytyy suojata aina korroosiota vastaan pinnoittamalla ja maahan kaivettuna tai upotettuna myös katodisella suojauksella. Tämän standardin mukaan katodinen suojaus toteutetaan yleensä meriympäristössä uh-rautuvalla anodilla ja maaperässä ulkoisella sähkövirralla.

ISO 13623 ei suoraan nimeä käytettäviä pinnoitteita, vaan esittää yleisiä vaatimuksia, jotka käytettävän pinnoitteen valinnassa täytyy huomioida. Näihin kuuluvat esimerkiksi pinnoitteen sähköinen eristyskyky, riittävä kemiallinen ja mekaaninen kestävyys ja mah-dollisuus korjata pinnoitetta. Tarkempia vaatimuksia eri pinnoitteille on esitetty muissa standardeissa, joista tässä esitellään kaksi: SFS-EN 10289 ja SFS-EN ISO 21809-1.

Standardi SFS-EN 10289 määrittelee kaksikomponenttisten epoksinpinnoitteiden vaati-muksia, kun nesteen tai kaasun siirtoon tarkoitettu pinnoitettu putki kaivetaan tai upote-taan rannikolle tai merelle. Standardi koskee sekä epoksinpinnoitteita että modifioituja epoksinpinnoitteita, jotka on tarkoitettu teräsputkien korroosion suojaukseen [108].

Tämä standardi nimeää kolme pinnoitepaksuutta sekä kolme lämpötilan mukaan jaettua käyttöympäristöä, joissa näitä voi käyttää. Nämä ovat esiteltynä taulukossa 33.

**Taulukko 33.**      *Epoksinnoitteiden käyttö standardi SFS-EN 10289 mukaan [108].*

Käyttölämpötilaväli	Pinnoitepaksuus
-20 °C – 40 °C	400 µm, 800 µm ja 1500 µm
-20 °C – 60 °C	800 µm ja 1500 µm
-20 °C – 80 °C	1500 µm

Standardi SFS-EN 10289 esittelee epoksinnoittamisen toimenpiteenä ja pinnoitteelta vaadittavat mekaaniset ja fysikaaliset ominaisuudet. Lisäksi standardin liitteet nimeävät näiden ominaisuuksien varmistamiseen soveltuvat tarkastustavat, joihin kuuluu esimerkiksi tasaisin väliajoin 100 päivän ajan tapahtuva sähköisen resistanssin mittaaminen [108].

Standardissa SFS-EN ISO 21809-1 määritellään maakaasu- ja öljyputkissa korroosioestoon käytettävien kolmikerroksisten polyolefiinipinnoitteiden vaatimat ominaisuudet. Näissä pinnoitteissa alin kerros on epoksia, välikerros on adhesiivi ja ylin kerros on joko polyeteeniä tai polypropeenä [109].

Tämä standardi jakaa nämä pinnoitteet ylimmän kerroksen mukaan kolmeen luokkaan ja ylin kerros määritetään käyttöympäristön lämpötilan mukaan. Nämä kolme luokkaa jaetaan lisäksi alaluokkiin riippuen maaperästä, johon putket kaivetaan tai upotetaan. Käytettävä ylimmän kerroksen minimipaksuus määritellään putken metripainon ja mainitun alaluokan mukaan [109].

Standardi SFS-EN ISO 21809-1 esittää polyolefiinipinnoitteille vastaavia fysikaalisia, kemiallisia ja mekaanisia vaatimuksia kuin standardi SFS-EN 10289 epoksinnoitteille. Eri ominaisuuksien varmentamiseen nimetään tarkastusmenetelmä, joka on esitetty joko standardin liitteenä tai toisessa standardissa [109].

## 6. MAAPERÄKORROOSION TUTKIMUSMENETELMÄT

Korroosioon liittyvä laboratoriotutkimus voidaan jaotella esimerkiksi materiaalien korroosionkestävyyden ja korroosioympäristön aggressiivisuuden testaukseen, korroosiomekanismien tutkimuksen sekä korroosionopeuden mittaus- ja seurantamenetelmien kehitykseen ja vaurioanalyysiin [110]. Maaperäkorroosion tutkimus on yleensä näistä ensimmäisenä mainittua ja sen yhteydessä selvitetäänkin maaperän ominaisuuksia kuten pH-arvoa tai ominaisvastusta. Tutkimus voi olla myös luonteeltaan vaurioanalyysiä, jos maassa oleva kappale, esimerkiksi putki, onkin vaurioitunut odottamattomasti. Tällöin menetelmät ovat vastaavat, mutta syöpyneen kappaleen alkuperäistä kuntoa ei välttämättä tarkasti tiedetä.

Luotettavinta tietoa materiaalien korroosionkestävyydestä saadaan käytännön olosuhteista, mutta nykyisin uusien materiaalien ja korroosionestomenetelmien kehitys on niin nopeaa, ettei käytännön tietoa ole saatavilla [110]. Tämä korostuu maaperäkorroosiossa, sillä maahan asennettujen kappaleiden, kuten putkien tai paalujen, on tarkoitus säilyä ympäristössään pitkään. Niitä ei yleensä myöskään kaiveta esiin kesken käytön, joten korroosion tarkastaminen on lähes mahdotonta, ellei ilmene vaurioita, kuten vuotoja. Referenssikappaleen nostaminen maasta on tarvittaessa mahdollista, mutta tällöin täytyy kiinnittää huomiota siihen, ettei nostettava kappale vaurioidu nostossa ja aiheuta mittauksiin tällä tavalla merkittävää vääristymistä.

### 6.1 Painohäviömittaus

Painohäviömittaus on vanhin ja yleisesti yhä käytetty menetelmä mitata korroosionopeutta. Tässä tutkimustavassa sopivankokoinen ja -muotoinen koekappale asetetaan todelliseen korroosioympäristöön sovituksi ajaksi. Kun koeaika on ohi, mitataan kappaleen menettänyt massa [111].

Myös silloin voidaan puhua painohäviömittauksesta, jos tutkittavasta koekappaleesta on suoraan mitattavissa esimerkiksi seinämäpaksuuden muutos. Tällöin mitattava paksuuden muutos on suoraan verrannollinen menetettyyn massa tiheyden kautta. Seinämäpaksuuden muutoksia voidaan mitata esimerkiksi työntömitalla tai mikrometriruuville [112].

Heikkoutena tässä tutkimusmenetelmässä on, että koetuloksista saadaan määritettyä ainoastaan kappaleeseen kohdistunut keskimääräinen korroosionopeus. Lisäksi tällä tavalla tehdyt mittaukset ovat usein työläitä ja vaativat paljon aikaa, jotta syöpymistä ilmenee [111].

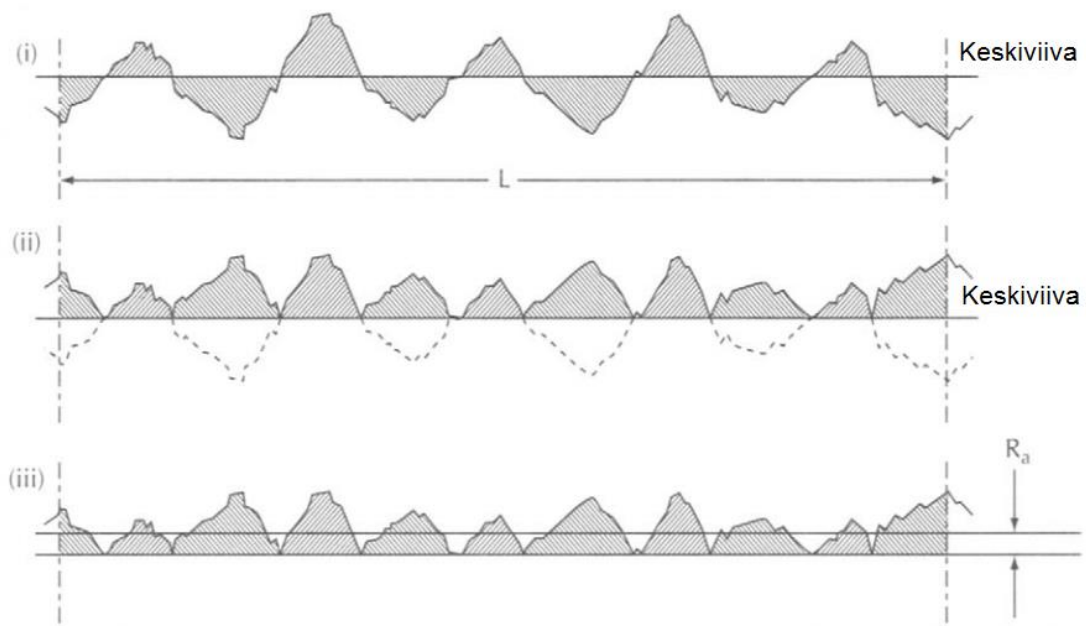
Tällä korroosiotutkimustavalla on kuitenkin myös useita etuja. Se on yleensä halpa, sillä se ei vaadi erityisiä mittalaitteita. Koekappaleita ja niissä ilmenevää korroosiota voi tarkastella silmämääräisesti ja mahdollisesti havaittuja kerrostumia voidaan analysoida muilla menetelmillä. Jos koekappaleissa ilmenee paikallista korroosiota, se voidaan havaita ja sen suuruus mitata erikseen [111].

Helsingin kaupungin pitkäaikaistutkimuksessa, jonka osana tämä diplomityö tehdään, painohäviömittaukset ovat keskeinen tapa selvittää korroosionopeutta. Painohäviötä mitataan sekä massan että seinämäpaksuuksien kautta. Massan menetystä mitataan metri-painomittauksen avulla. Seinämäpaksuuksien muutoksien tutkimista varten käytössä on mekaanisia mittalaitteita, kuten mikrometriruuveja, mikroskooppeja sekä optisia mittalaitteita, kuten HandySCAN 700™ -lasermittauslaite. Näitä käsitellään tarkemmin tämän diplomityön kokeellisessa osuudessa luvussa 7.3.

## 6.2 Pinnankarheuden määrittäminen optisella profilometrialla

Optisessa profilometriassa valonsäteen kulun avulla pystytään määrittämään pinnan muotoja. Tällä menetelmällä voidaan mitata esimerkiksi pinnankarheussuureita, jotka ovat eräs tapa kuvata topografista laatua. Näitä on useita erilaisia, mutta tässä työssä keskitytään kolmeen:  $R_a$ ,  $R_q$  ja  $R_z$ . Pinnankarheussuureita määritellään standardissa SFS-EN ISO 4287 [113].

$R_a$ -arvo on yleismaailmallisesti tunnistetuin ja käytetyin pinnankarheussuure. Se on profiilin keskiviivasta tapahtuvan poikkeaman suuruuden aritmeettinen keskiarvo. Pintaprofiilin keskiviiva määritetään siten, että se jakaa tutkittavalla matkalla  $L$  keskimääräisen profiilikorkeuden kahteen yhtä suureen osaan, kuten kuvassa 26 kohdassa (i) [114].



**Kuva 26.**  $R_a$ -arvon määrittely, muokattu lähteestä [114].

Koska näiden kahden osan summa on määritelmällisesti nolla, eivät ne itsessään ole hyödyllisiä. Jos keskiviivan alle jäävistä negatiivisista poikkeamista tehdään positiiviset, kuten kuvassa 26 kohdassa (ii), pystytään tästä muokatusta muodosta määrittämään keskimääräinen korkeus keskiviivaan nähden, joka on  $R_a$ -arvo kuvan 26 kohdan (iii) mukaisesti [114].  $R_a$ -arvo lasketaan yleensä käyttäen kaavaa

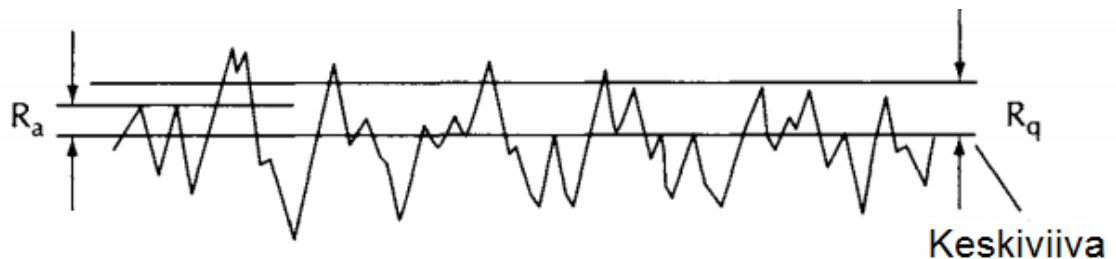
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx, \quad (3) [113]$$

jossa itseisarvomerkit esittävät kuvassa 26 kohdassa (ii) tapahtuvaa muutosta suhteessa saman kuvan kohtaan (i) ja  $z(x)$  on keskiviivasta mitattu profiili kohdassa  $x$  [114].

Koska  $R_a$ -arvo yksinään ei ole riittävä kuvaamaan pinnankarheutta esimerkiksi suhteessa profiilien huippujen ja laaksojen väliseen etäisyyteen, on käytettävä myös muita pinnankarheussuureita.  $R_q$ -arvo on  $R_a$ -arvoa vastaava neliöllinen keskiarvo, joka huomioi profiilikäyrän muodon  $R_a$ -arvoa paremmin [114].  $R_q$ -arvo lasketaan kaavalla

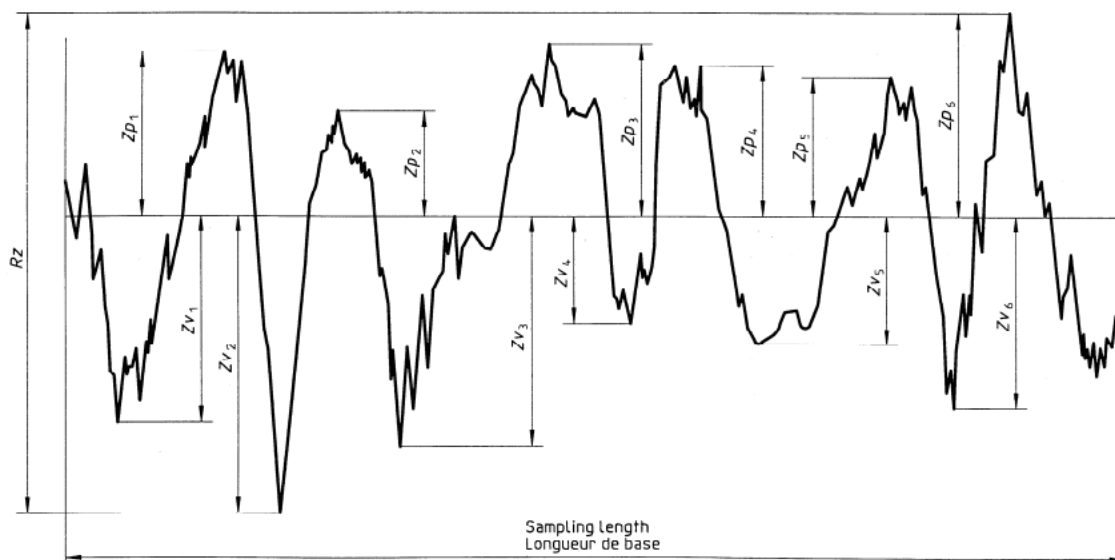
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l z(x)^2 dx}. \quad (4) [113]$$

$R_q$ -arvo on tyypillisesti 10–25 % isompi kuin  $R_a$ -arvo [114], kuten kuvasta 27 ilmenee.



**Kuva 27.**  $R_a$ -arvon ja  $R_q$ -arvon ero, muokattu lähteestä [114].

$R_z$ -arvo määritellään profiilissa näytepituudella esiintyvän korkeimman huipun ja syvimmän laakson välisenä korkeuserona [113; 114].  $R_z$ -arvon määrittäminen on esitetty kuvassa 28.



**Kuva 28.**  $R_z$ -arvon määrittäminen [113].

### 6.3 Polarisaatiomittaukset

Koska perinteiset painohäviökokeet ovat tyypillisesti hitaita, ovat korroosioprosessien teoreettinen tuntemus sekä mittausmenetelmien ja -laitteistojen kehittyminen mahdollistaneet uusien sähkökemiallisten korroosionopeuden määrittämis- ja seurantamenetelmien käyttöönoton [115]. Nämä tutkimusmenetelmät perustuvat pääasiassa reaktiokinetiikan eli elektrodeilla tapahtuvien polarisaatioilmiöiden tutkimiseen [110]. Polarisaatiolla tarkoitetaan korroosiotutkimuksessa elektrodin ja liuoksen tasapainotilaisesta potentiaalierosta tapahtuvaa potentiaalil poikkeamaa [115].

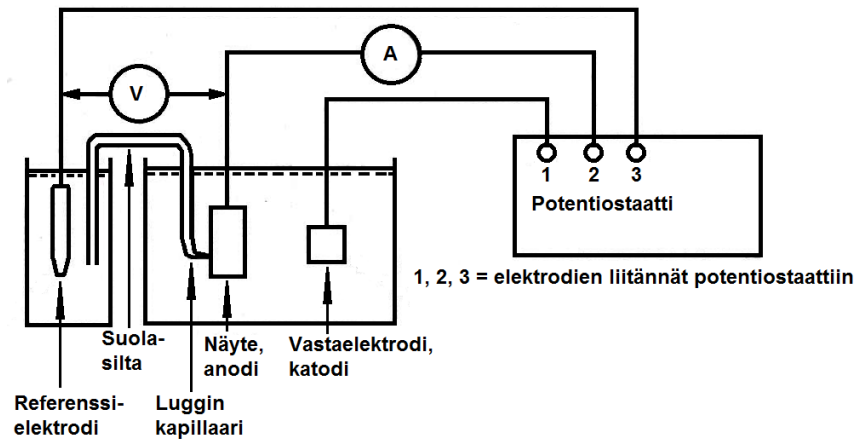
Yleensä tutkimusmenetelmissä keskeisessä roolissa ovat polarisaatiokäyrät. Polarisaatiokäyrissä on esitettyä näytekalvojen ja elektrolyytin muodostaman systeemin potentiaali-virrantiheys-riippuvuus. Niitä voidaan käyttää paikallisen korroosion, korroosioympäristön tai korroosiomekanismien ja -käyttäytymisen, kuten passivaation, tutkimiseen sekä esimerkiksi pinnoitteiden testaamiseen [110]. Polarisaatiomittaukset ovat alkuvaiheen korroosioriskin mittausmenettely, joka esimerkiksi maaperäkorroosion suhteen antaa vain hyvin yleispiirteisen kuvan ja jättää huomioimatta esimerkiksi korroosiotuotteen syntymisen tai olosuhteiden, kuten elektrolyytin, muuttumisen hyvin pitkien aikojen kuluessa.

#### 6.3.1 Polarisaatiokäyrien mittaaminen

Polarisaatiokäyrien määrittämiseen käytetään potentiostaattilaitteistoa. Perinteinen potentiostaattilaitteisto koostuu mittakennosta sekä varsinaisesta sähköisestä potentiostaattiyksiköstä, jonka tehtävänä on säätää ja mitata mittauskennon elektrodien välistä potentiaa-

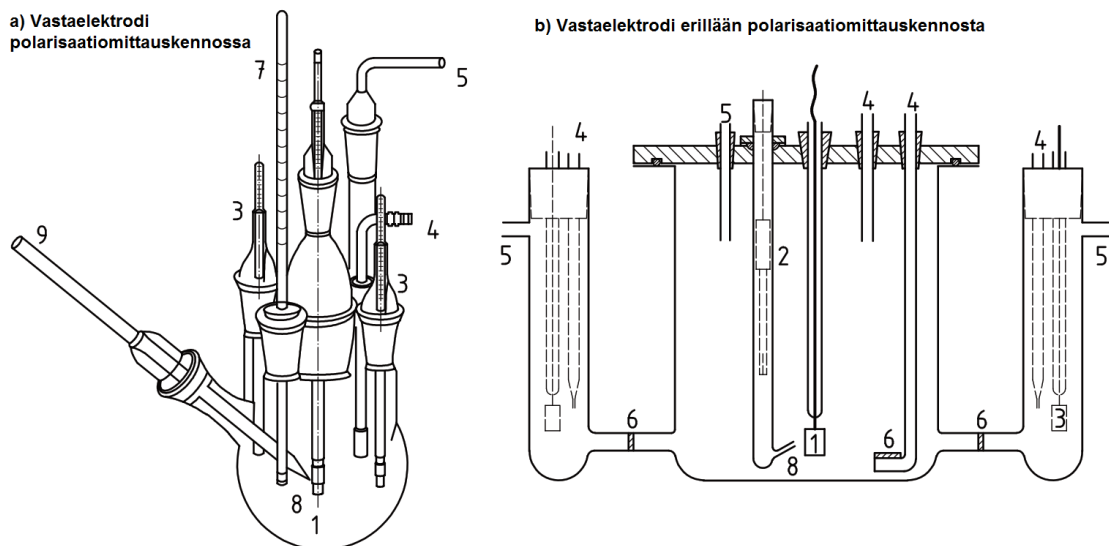


lia. Nykyiset potentiostaattilaitteistot ovat usein kytkettyinä tietokoneeseen mittausjärjestelyjen ja tulosten käsittelyn automatisoinniksi [110]. Potentiostaattilaitteiston periaate on esitettyä kuvassa 29. SFS-EN ISO 17475 -standardin mukaiset polarisaatiomittauskennojen rakenteet ovat kuvassa 30.



**Kuva 29.** Polarisaatiomittauksissa käytettävän potentiostaattilaitteiston periaate, muokattu lähteestä [110].

Kuten kuvasta 29 käy ilmi, potentiostaatin mittauskenno koostuu kolmesta elektrodista, jotka ovat tutkittava näyte, referenssielektrodi ja vastaelektrodi [110; 116]. Lisäksi mittauskennoissa pitää olla sisään- ja ulosyöttö kaasuille ja mahdollisuus lämpömittarin liittämiselle [116], kuten kuvassa 30 on esitetty.



**Kuva 30.** SFS-EN ISO 17475 -standardin mukaiset polarisaatiomittauskennot, muokattu lähteestä [116]. Kuvan selitykset: 1. näyte 2. referenssielektrodi 3. vastaelektrodi 4. referenssielektrodi 5. kaasusyöttö 6. puoliläpäisevä levy 7. lämpömittari 8. Luggin kapillaari 9. suolasilta referenssielektrodista (elektrodiä ei esitetty).



Tutkittavan näytteen ja elektrodin rajapinnan potentiaaliero ei voida suoraan mitata, vaan potentiaali täytyy määrittää sopivaa referenssielektrodiä käyttäen. Yleisimmin käytetty referenssielektrodi on niin sanottu kyllästetty kalomelielektrodi (SCE) [110; 116] tai hopea/hopeakloridielektrodi, mutta referenssielektrodin valinta riippuu esimerkiksi käyttöympäristöstä ja lämpötilasta [116].

Referenssielektrodi voi sijaita pääkennossa, mutta sen kunnosta pitää huolehtia. Kaksi-suuntaisen kontaminaation välttämiseksi referenssielektrodi voi esimerkiksi sijaita erillisessä kammiossa ja olla yhdistettynä pääkennoon suolasillalla [116]. Referenssielektrodi pyritään viemään niin sanotun Luggin kapillaarin avulla mahdollisimman lähelle tutkittavan näytteen pintaa, jotta vältettäisiin elektrolyytin vastuksen aiheuttama jännitteen putoaminen [110; 116].

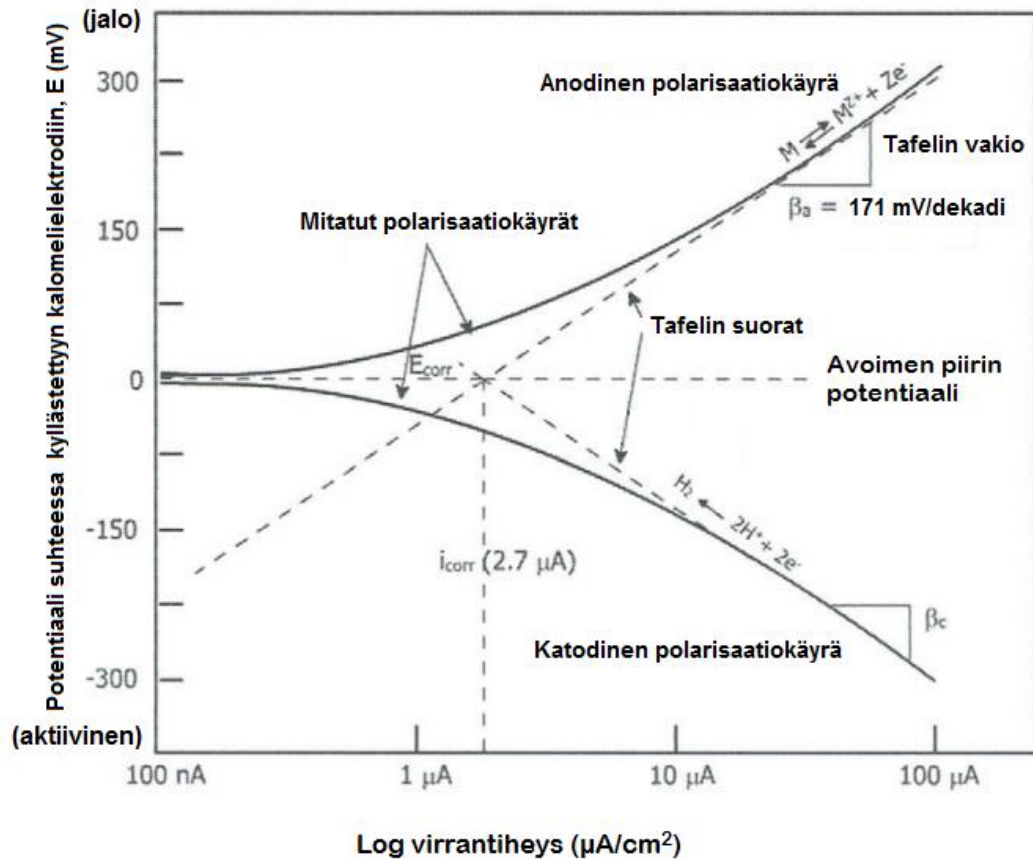
Vastaelektrodi ja tutkittava näyte muodostavat piirin, johon potentiostaatin vahvistinpiiri syöttää virtaa [110]. Vastaelektrodin pitää sijaita siten, että virran jakautuminen näytteelle on symmetristä. Vastaelektrodina käytetään yleisimmin platinaelektrodiä ja niitä voi olla joissain tapauksissa kaksikin [116].

Polarisaatiokäyrien mittauksessa käytetään joko potentiostaattista tai potentiodynaamista menetelmää. Potentiostaattisessa menetelmässä potentiaalia muutetaan portaittain. Portaiden koko voi vaihdella 5-100 mV [110], mutta potentiostaatin pitää kyetä mittaamaan se  $\pm 1$  mV tarkkuudella [116]. Potentiaalimuutoksen jälkeen virran annetaan tasaantua tässä potentiaalissa vakioajan, joka voi vaihdella 0,5-5 min välillä [110]. Potentiostaattiyksikön virran mittaukselle suurin sallittu virhe on 0,5 % [116]. Potentiodynaamisessa menetelmässä potentiaalia muutetaan jatkuvasti vakionopeudella [110] ja potentiostaatin pitää kyetä jatkuvaan mittaamiseen [116].

Metallin ja liuoksen rajapinnan läpi kulkevan virran asettuminen tasapainoon voi viedä kauan johtuen syntyvistä korroosiotuotteista. Potentiaalimuutosnopeudella ja -tavalla onkin huomattava merkitys polarisaatiokäyrän muotoon, sillä määrittämisessä käytetty muutosnopeus vaikuttaa siihen, kuinka paljon virran arvo poikkeaa tasapainoarvosta. Tämän vuoksi vertailtaessa materiaalien korroosioikäytymistä täytyy polarisaatiokäyrien olla samalla tavalla ja samalla potentiaalimuutosnopeudella määritettyjä [110].

### 6.3.2 Polarisaatiokäyrien analysoiminen

Merkittävimmät tavat käyttää polarisaatiokäyriä todellisen korroosionopeuden kvantitatiiviseen määrittämiseen ovat Tafelin suorien ekstrapolaatiomenetelmät, polarisaatiovastusmenetelmät ja vaihtovirta- eli impedanssimenetelmät [115]. Mitatussa polarisaatiokuvajasssa on yleensä kaksi polarisaatiokäyrää, pelkistysreaktiota kuvaavan katodisen ja metallin liukenemisreaktiota kuvaava anodisen yksittäisreaktion kuvaajat. Tällaisista polarisaatiokäyrät ovat esitettynä kuvassa 31.



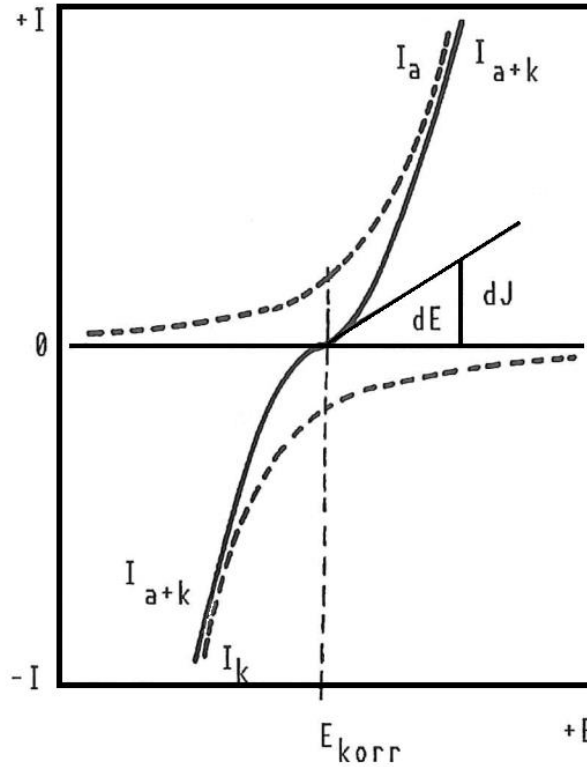
**Kuva 31.** Polarisaatiokäyrät potentiaali-virrantiheyskuvaajassa, muokattu lähteestä [117].

Kuvassa 31 polarisaatiokäyrille on piirretty Tafelin yhtälöiden mukaiset suorat ja määritetty näiden kulmakertoimet,  $\beta_a$  anodiselle ja  $\beta_c$  katodiselle polarisaatiokäyrälle. Näitä kulmakertoimia kutsutaan Tafelin vakioiksi tai kertoimiksi ja niiden yksikkönä on tavallisesti mV/dekadi tai V/dekadi [115]. Dekadilla tarkoitetaan logaritmisin asteikon yhtä kertaluokkaa.

Kuvassa 31 on myös ekstrapoloitu Tafelin suoria leikkaamaan korroosipotentiaali  $E_{corr}$ . Tästä pisteestä on määritetty virrantiheys  $i_{corr}$ , jota joskus kutsutaan korroosionopeudeksi [115]. Tätä menetelmää kutsutaan Tafelin suorien ekstrapolaatiomenetelmäksi. Todellisen korroosionopeuden halutussa yksikössä pystyy laskemaan sijoittamalla tämän  $i_{corr}$  Faradayn lakiin [117].

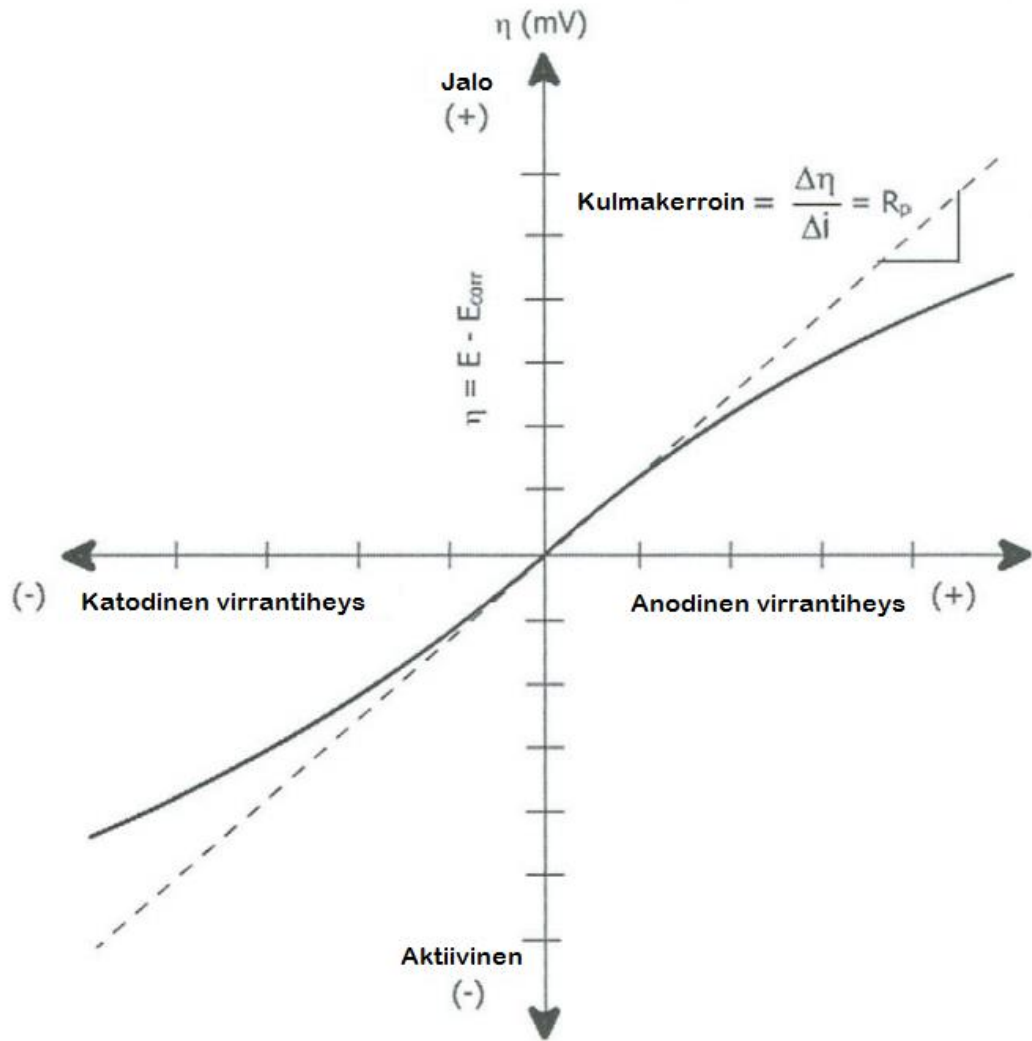
Tafelin ekstrapolaatiomenetelmällä on heikkoutensa. Näytekalteen muoto täytyy olla tarkka, jotta saavutetaan tasainen virta, mutta korkea virta voi myös vaurioittaa näytettä vaikuttaen mittaustuloksiin. Lisäksi alue, jolla Tafelin suorat esiintyvät, voi olla vaikeasti määritettävissä, jos tutkittavalla pinnalla tapahtuu useita konsentraatio- ja aktivaatiopolarisaatioilmiöitä [117].

Polarisaatiovastusmenetelmissä korroosionopeus määritetään niin sanotun polarisaatiovastuksen  $R_p$  avulla. Syöpyvän metallin polarisaatiovastus määritellään mitatusta polarisaatiokäyrästä esittämällä tulokset lineaarisessa muodossa. Esimerkki lineaarisesta polarisaatiokäyrästä on kuvassa 32.



**Kuva 32.** Polarisaatiokäyrä lineaarisessa muodossa korroosiopotentiaalin ympäristössä, muokattu lähteestä [115].

Kuvassa 32 on esitettyä myös polarisaatiovastuksen määrittäminen. Polarisaatiovastus on esitetyn kuvaajan kulmakerroin korroosiopotentiaalissa. Mikäli polarisaatiokäyrä on lineaarinen korroosiopotentiaalin ympäristössä, voidaan polarisaatiovastus määrittää käyrän tangentinä korroosiopotentiaalin  $E_{corr}$  kohdalla [115], kuten kuvassa 33.



**Kuva 33.** Lineaarinen polarisaatiokäyrä, muokattu lähteestä [117]

Monet kaupalliset korroosionopeusmittalaitteet perustuvat lineaariseen polarisaatiomenetelmään. Polarisaatiovastusmenetelmää käytetään korroosionopeuden jatkuvaan tarkkailuun käytännön kohteissa, sillä korroosionopeuden määrittäminen voidaan suorittaa nopeasti vaikuttamatta mittauksella korroosionopeuksiin ja menetelmällä voidaan mitata pieniä korroosionopeuksia ja korroosionopeuden muutoksia [115].

## 7. KOKEELLINEN OSUUS

Tämä diplomityö on osa Helsingin kaupungin kiinteistöviraston toteuttamaa pitkäaikais-tutkimusta, jonka tarkoituksen on kartoittaa mahdollisuuksia kaavoittaa ja rakentaa Hel-singin kaupungin alueella sijaitseville alueille, joita ei vielä hyödynnetä rakennuskäy-tössä. Näihin alueisiin kuuluu myös tutkittava Kyläsaaren ja Hermanninrannan alue.

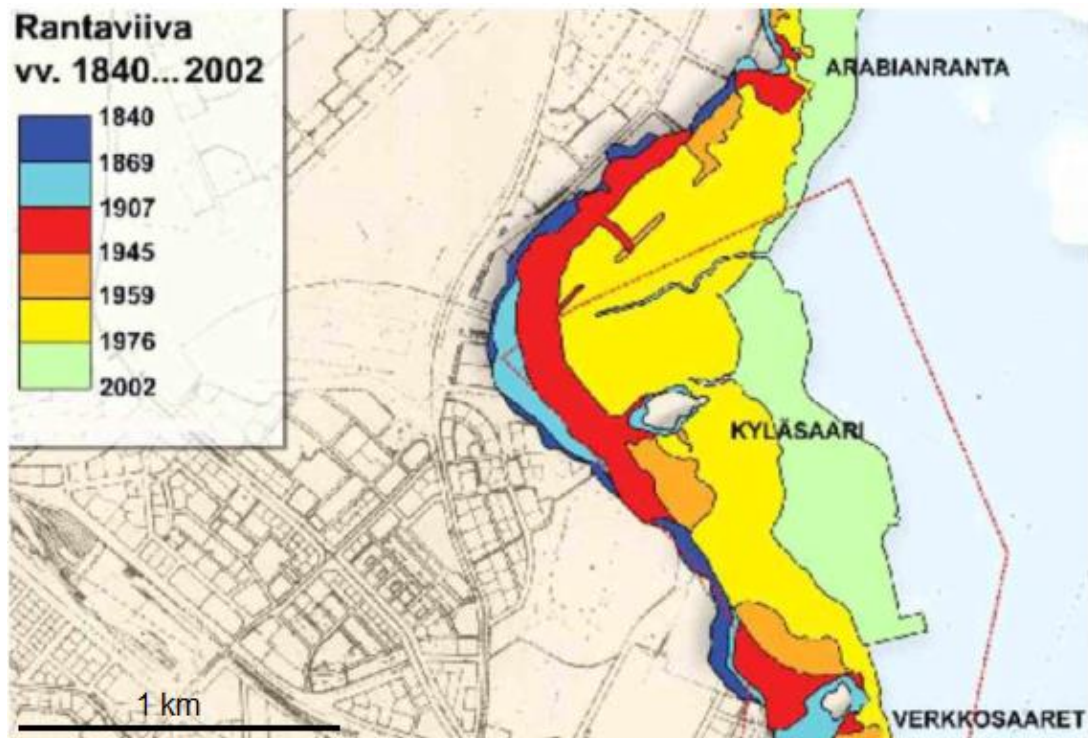
Tämän pitkäaikaistutkimuksen toteutuskesto on 15 vuotta ja siinä kerätään tietoa teräs- ja teräsbetonipaalujen korroosiokäyttäytymisestä maaperässä, joka sisältää sekalaista täyt-tömaata ja on lisäksi mikrobiologisen korroosion kannalta aktiivisella alueella. Kerätyn tutkimustiedon perusteella on tarkoitus tehdä päätöksiä, joiden aikajänne on 100 vuotta.

Korroosiotutkimuksen aloittaa tämä aihetta käsittelevästä kirjallisuusselvityksestä ja ko-keellisesta osuudesta koostuva diplomityö. Tämän työn kokeellinen osuus sisältää tutkit-tavan alueen maaperä- ja vesinäyteanalyysejä sekä valmistelevat mittaukset varsinaiselle korroosiokokeelle, joka toteutetaan todellisessa korroosioympäristössä teräspaaluilla, jol-laisia alueen varsinaisessakin rakennustyössä käytettäisiin. Valmistelevilla mittauksilla määritetään mahdollisimman tarkasti koekappaleiden alkuperäiset mitat, jotta jatkotutki-muksissa saatavia korroosiomittaustuloksia voitaisiin verrata niihin uskottavasti ja mah-dollisimman pienellä epätarkkuudella.

### 7.1 Paalutuspisteiden vertailu Kyläsaaren korroosioympäris-töön

Helsingin kaupungin Kalasataman pohjoisosassa sijaitsee Kyläsaaren alue. Alueella on toiminut muun muassa jätevedenpuhdistamo 1930-luvulta 1990-luvun puoliväliin sekä jätteenpolttolaitos 1960-luvulta vuoteen 1983.

Kyläsaaren merenlahtea on täytetty sekalaisella maa-aineksella jo 1800-luvulla. 1900-luvun jälkipuoliskolla toimineessa jätteenpolttolaitoksessa poltettiin Helsingissä kerättyä lajittelematonta kaatopaikkajätettä vanhanaikaisella arinapolttotekniikalla. Suhteellisen matalasta polttolämpötilasta johtuen osa poltetusta aineesta paloi vain osittain tai jäi ko-konaan palamatta. Lajittelemattoman polttoaineen vuoksi polttolaitoksen tuhka ja kuona-aines sisälsi myös muun muassa metallitavaraa, betonia ja kiviä. Syntynyt jäte käytettiin viereisen merenlahden täyttöön. Merenlahtea on täytetty polttolaitoksen tuhkan lisäksi myös muulla määrittelemättömällä täyttöaineksella. Kyläsaaren täytön kehitys on esitet-tynä kuvassa 34.



**Kuva 34.** Merenlahden täytön kehitys Kyläsaaren ympärillä eri aikoina [118].

Helsingin kaupunki on teettänyt Kyläsaaren alueesta useita maaperä- ja pilaantuneisuusselvityksiä, joista viimeisin on vuodelta 2015 [119]. Tässä työssä alueen yleinen korroosioympäristö arvioidaan tässä tutkimuksessa mitatun datan perusteella.

### 7.1.1 Kyläsaaren maaperä

Tässä työssä arvioidaan 50-, 60- ja 70-luvulla tehtyjen maatyöjen korroosiovaikutusta teräspalkkeihin. Tämä tutkittava maaperäalue on kuvassa 34 esitetty keltaisella ja oranssilla ja sijaitsee Kyläsaaren eteläpuolella kohti Verkkosaaria. Tutkittava alue on tarkemmin esitetty kuvassa 35.

Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluvirasto (KSV) on teettänyt maaperäselvityksen [119], josta käy ilmi, että arvioitu tuhkatäytön alareuna on syvimmillään noin 6 m syvyydessä maanpinnasta alueella, johon tutkimuksen putkipaalut lyödään. Vastaavasti tällä alueella pohjaveden pinnan arvioidaan olevan syvimmillään 3 m maanpinnasta, mutta pääasiassa kuitenkin korkeammalla 1-2 m syvyydessä.



*Kuva 35. Korroosiotutkimuksen tutkimusalue [120].*

### 7.1.2 Kyläsaaren alueen läjitys 50-luvulta 70-luvulle

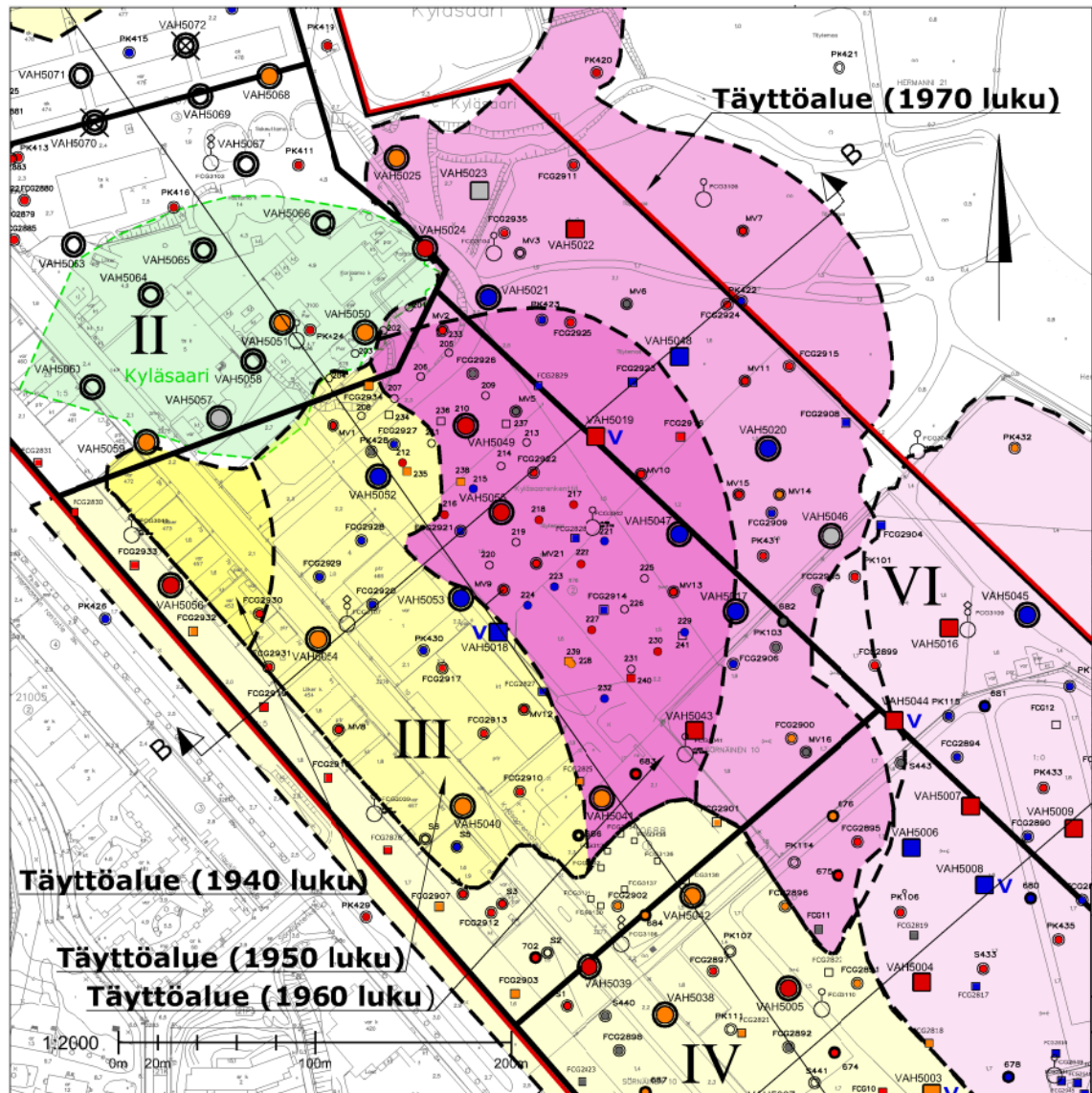
Tutkittavasta täyttöalueesta vanhin osuus on ajoitettu ilmakuvien perusteella 50-luvulle ja uusin 70-luvulle. Täyttöalueen jakautuminen eri vuosikymmenille on esitetty kuvassa 36. Kuvassa 36 on esitetty myös aikaisemmassa maaperä- ja pilaantuneisuusselvityksessä käytetyt maaperänäytteenottopisteet ympyröinä ja neliöinä.

Alueelta otettuja maaperänäytteitä kuvataan tuhkaisiksi tai öljyisiksi [119]. Osassa näytteenottoaikoja tuhka on mustaa ja osassa harmaata.

Maaperänäytteissä on havaittu erilaisia tavallisesta kiviaineksesta poikkeavia täytemateriaaleja: tiiltä, betonia, lasia, metallia, asfalttia, puuta, posliinia, kangasta ja muovia. Osassa näytteenottoaikoista jätteen osuus otetuissa näytteissä on ollut selkeä, suurimmillaan 5-20 %. Näytteissä esimerkiksi jätemetalli on esiintynyt selvinä kappaleina, koska sitä on kuvattu metalliromuna.

Maalajiksi arvioidaan näytteenottosyvyydestä riippuen soraksi, hiekaksi, siltiksi tai saveksi. Käytetyn täyttömaan osalta yleisimmät maalajit ovat hiekka ja sora.





**Kuva 36.** Helsingin kaupungin maaperä- ja pilaantuneisuusselvityksissä arvioitu täyttöalueiden jakautuminen eri vuosikymmenille [119]. Kyläsaarenkatu kulkee 40- ja 50-lukujen täyttöalueiden poikki.

Alueelta otettujen maaperänäytteiden pH on vaihdellut neutraalista lievästi emäksiseen. Lisäksi pH-arvo on vaihdellut myös näytteenottosyvyyden mukaan, sillä eräässä 60-luvun läjityksen mittauspisteestä on havaittu vaihtelu arvojen 7,0-10,3 välillä syvyydestä riippuen. Taulukossa 34 on esitettyä yleinen pH:n vaihtelu täyttöajankohdan mukaan.

**Taulukko 34.** pH:n vaihtelu Kyläsaaren alueen tutkimuspisteissä ajanjaksoittain.

pH	Täytön suoritus aika		
	50-luku	60-luku	70-luku
alin mitattu	7,7	7,9	7,5
ylin mitattu	8,9	9,0	8,6



Maaperän pilaantumisselvityksessä on lisäksi muutamista yksittäisistä mittauspisteistä määritetty maanäytteen sähkönjohtavuus ja sulfaattipitoisuus. Pitoisuuksien määrittäminen on tehty käyttäen kaksivaiheista liukoisuustestiä, joka määritellään standardissa SFS-EN 12457-3 [121]. Tulokset ovat esitetty taulukossa 35. Sähkönjohtavuus on taulukossa esitetty myös ominaisvastuksena kirjallisuusvertailua varten.

**Taulukko 35.** *Maaperänäytteiden sulfaattipitoisuuksia ja sähkönjohtavuuksia alueella.*

Täytön suoritus-aika	Mittaus-pisteen tunnus	$SO_4^{2-}$ -pitoisuus (mg/kg kuiva-ainetta)	Sähkönjohtavuus (mS/m)	Ominaisvastus ( $\Omega$ m)
50-luku	VAH5018	1659	30,2	33,1
	VAH5052	6849	97,1	10,3
60-luku	FCG2923	4700	-	-
70-luku	VAH5020	2961	55,3	18,1
	VAH5021	7664	129	7,8

Lisäksi tässä tehdyssä PIMA-selvityksessä analysoitiin maaperänäytteistä keskeisimpiä haitallisiksi määriteltäviä metalleja. Sähkökemiallisen korroosion kannalta raskasmetalleista tärkein on kupari. Taulukossa 36 on esitetty kuparin esiintyminen alueen maaperästä otetuissa näytteissä.

**Taulukko 36.** *Kuparipitoisuus tutkittavalla alueella.*

Ylempi ohjearvo kuparille: 200 mg/kg kuiva-ainetta Vaarallisen jätteen raja-arvo kuparille: 2500 mg/kg kuiva-ainetta	Täytön suoritus-aika		
	50-luku	60-luku	70-luku
Ylemmän ohjearvon ylittäviä näytteitä (kpl)	5	10	9
Vaarallisen jätteen raja-arvon ylittäviä näytteitä (kpl)	3	-	3
Korkein mitattu kuparipitoisuus (mg/kg kuiva-ainetta)	5595	-	9580

### 7.1.3 Paalutuspisteiden maanäytteet

Helsingin kaupungin rakentamispalvelu Stara otti varsinaisista paalutuspisteistä marraskuun alussa 2013 maaperänäytteet ja toimitti ne Novalab Oy:n laboratorioon, jossa ne analysoitiin marras-joulukuun 2015 aikana. Maalajimääritykset tehtiin Staran geotekniikassa laboratoriossa.

Paalutuspisteet ovat esitetty kuvassa 37. Kuvassa A-pisteen paalu on 50-luvun täytön alueella, B-pisteen paalu 60-luvun täytön alueella ja C-pisteen paalu 70-luvun täytön alueella.



**Kuva 37.** Korroosiotutkimusta varten asennettujen paalujen ja orsivesinäytteidenotto-  
paikkojen sijainnit kartalla. Kuvassa punaisella on merkitty paalutuspaikat ja sinisellä vesi-  
näytteidenotot. Kuva on muokattu lähteestä [120].

Taulukoissa 37-44 on esitetty laboratorioanalyysien keskeisimpiä tuloksia. 50-luvun täytöstä tehtiin tulosmäärältään kattavin analyysi. Maaperän huokosveden korvaamiseksi taulukoissa 42-44 esitetyt analyysitulokset on tehty maanäytteistä yksivaiheisella uutolla L/S 10. Kaikki mitatut tulokset ovat liitteen 2 laboratorioanalyysien tutkimustodistuksissa ja Novalab Oy:n kemiallisiin analyyseihin käyttämät menetelmät standardeineen ilmenevät niistä. Staran geoteknisen laboratorion tulokset ovat liitteessä 3.

**Taulukko 37.** 50-luvun täytön (A) metallipitoisuudet.

Syvyys (m)	Metallipitoisuus (mg/kg kuiva-ainetta)										
	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	V	Zn
0-0,5	3,9	<0,50	4,4	25	30	<0,50	11	19	0,95	22	130
0,5-1	4,2	<0,50	3,3	43	17	<0,50	7,1	15	1,1	20	47
1-1,5	3,1	<0,50	3	17	60	<0,50	10	71	1,6	18	120
1,5-2	22	3,6	10	52	560	1,8	110	2400	140	20	1800
2-2,5	19	6,7	12	94	1200	<0,50	54	730	27	37	6700
2,5-3	23	6,1	11	59	650	0,81	58	870	30	40	1800
4-4,5	50	14	21	75	1100	0,63	120	750	28	17	4300

**Taulukko 38.** 60-luvun täytön (B) metallipitoisuudet.

Syvyys (m)	Metallipitoisuus (mg/kg kuiva-ainetta)										
	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	V	Zn
0,5-1	11	1,6	6,1	39	210	<0,50	27	660	16	23	450
1-1,5	8,9	1,6	8,7	42	230	2,2	43	420	11	16	840
1,5-2	44	7,7	21	82	2000	1,1	240	3800	47	19	5500

**Taulukko 39.** 70-luvun täytön (C) metallipitoisuudet.

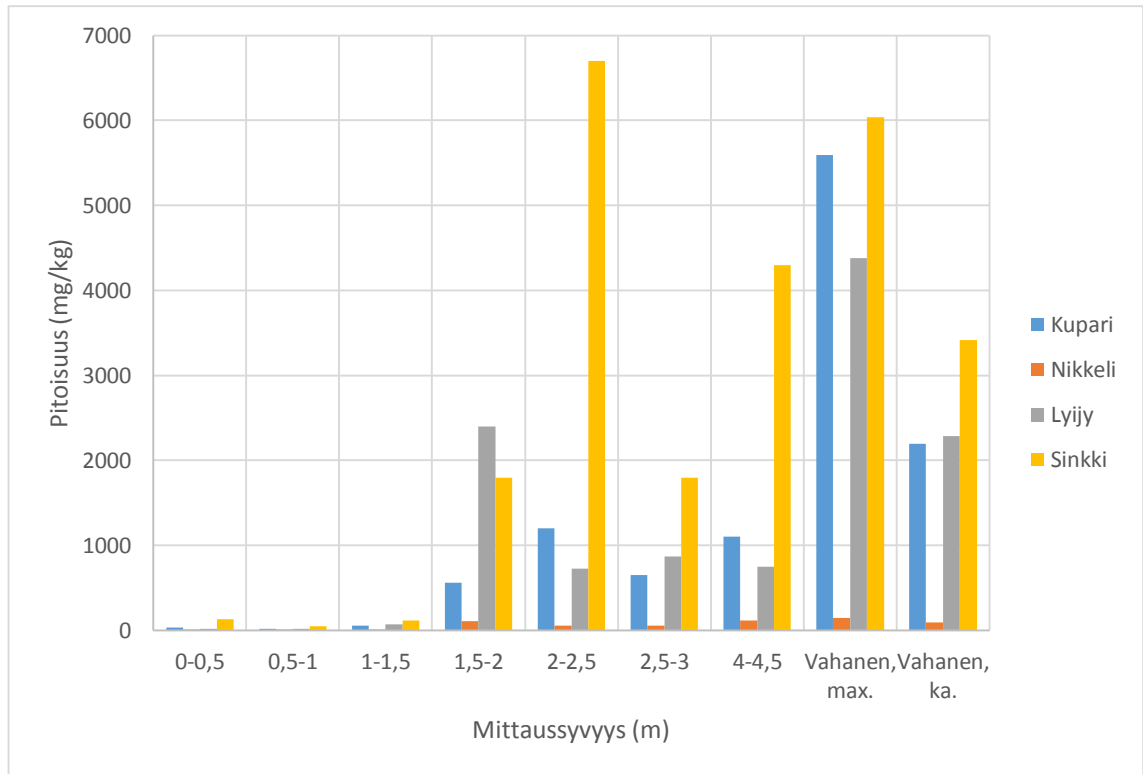
Syvyys (m)	Metallipitoisuus (mg/kg kuiva-ainetta)										
	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	V	Zn
2-2,5	26	2,3	15	42	85	<0,50	47	100	7,3	110	330
4-4,5	25	2,1	14	38	73	<0,50	43	99	6,7	100	290

**Taulukko 40.** 50- ja 60-luvun täytön analyysituloksia.

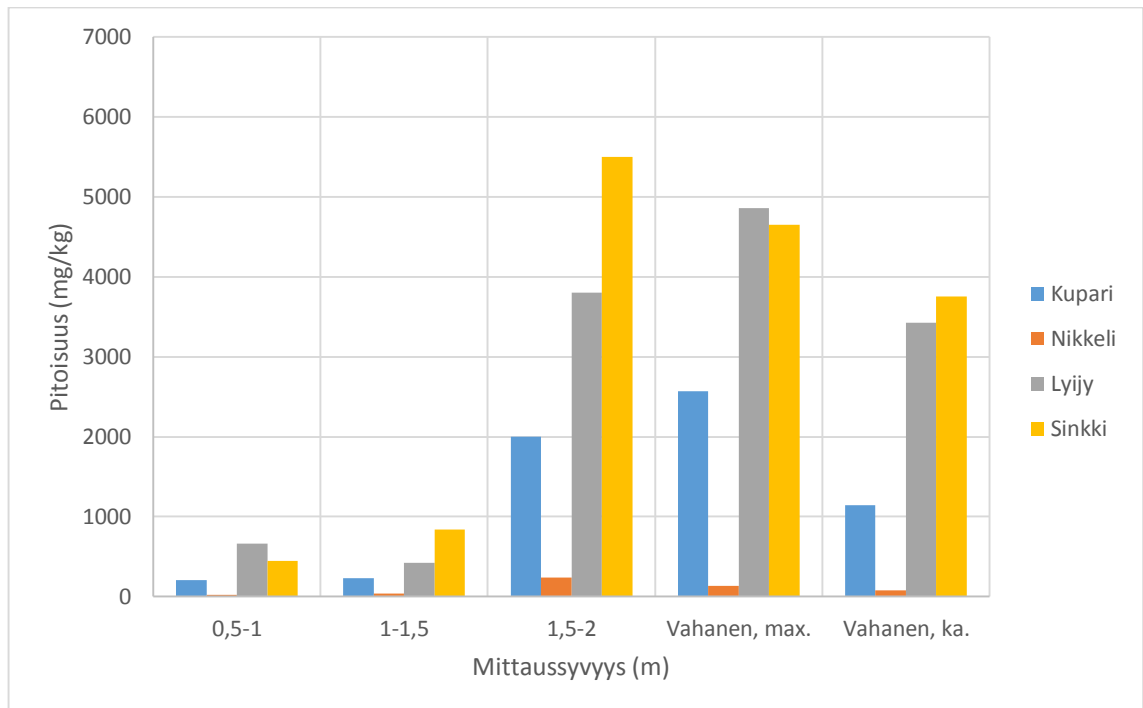
Syvyys (m)	50-luvun täyttö			60-luvun täyttö		
	pH	Cl <sup>-</sup> (mg/kg) tulokosteassa	S (g/kg)	pH	Cl <sup>-</sup> (mg/kg) tulokosteassa	S (g/kg)
0-0,5	-	21	0,58	-	-	-
0,5-1	-	63	0,74	-	63	0,71
1-1,5	9,0	6,8	0,45	7,1	15	0,92
1,5-2	-	23	2,4	-	32	5,0
4-4,5	8,2	-	-	-	-	-
6-6,5	-	1200	11	-	-	-

Kuvissa 38 ja 39 on esitettyinä taulukoiden 37 ja 38 metalleista ne, joiden voidaan arvioida olevan galvaanisen korroosion suhteen merkittävimmät. Kuvissa 38 ja 39 on verrattu taulukoiden 37 ja 38 arvoja aikaisemmassa PIMA-selvityksessä alueelta mitattuihin arvoihin.

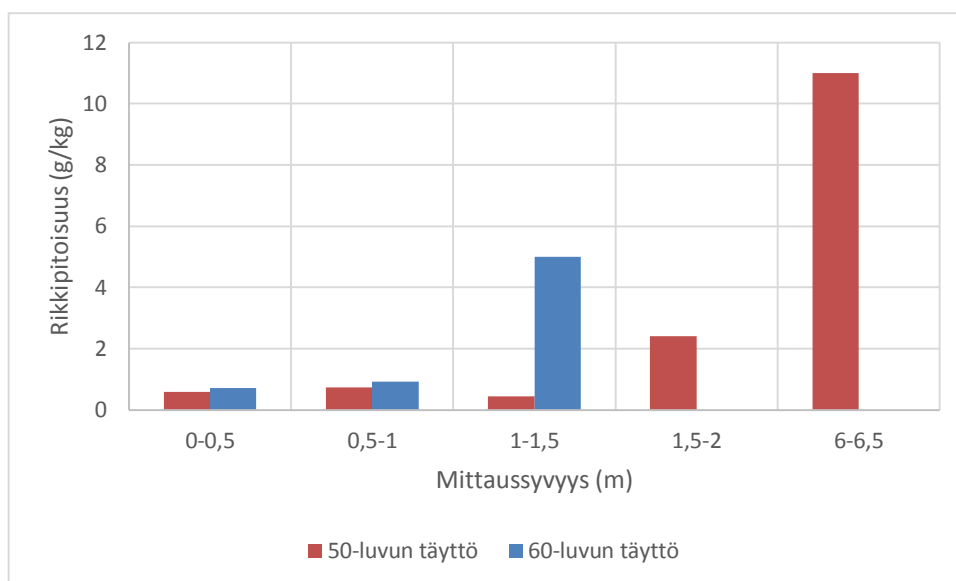
Kuvassa 39 esitetty aikaisemman PIMA-selvityksen suurin arvo on kuitenkin kyseisessä selvityksessä esitetty alueen toiseksi suurin arvo, sillä suurimmat arvot esiintyivät veneiden säilytysalueella. Sinkin ja lyijyn pitoisuudet olivat säilytysalueelta mitatuissa arvoissa nelinkertaiset kuvassa 39 esitettyihin maksimipitoisuuksiin nähden. On syytä epäillä, että nämä pitoisuudet johtuvat esimerkiksi veneiden suojamaalaamisesta.



**Kuva 38.** 50-luvulla täytetyn alueen paalutuspisteen metallipitoisuudet.



**Kuva 39.** 60-luvulla täytetyn alueen paalutuspisteen metallipitoisuudet.

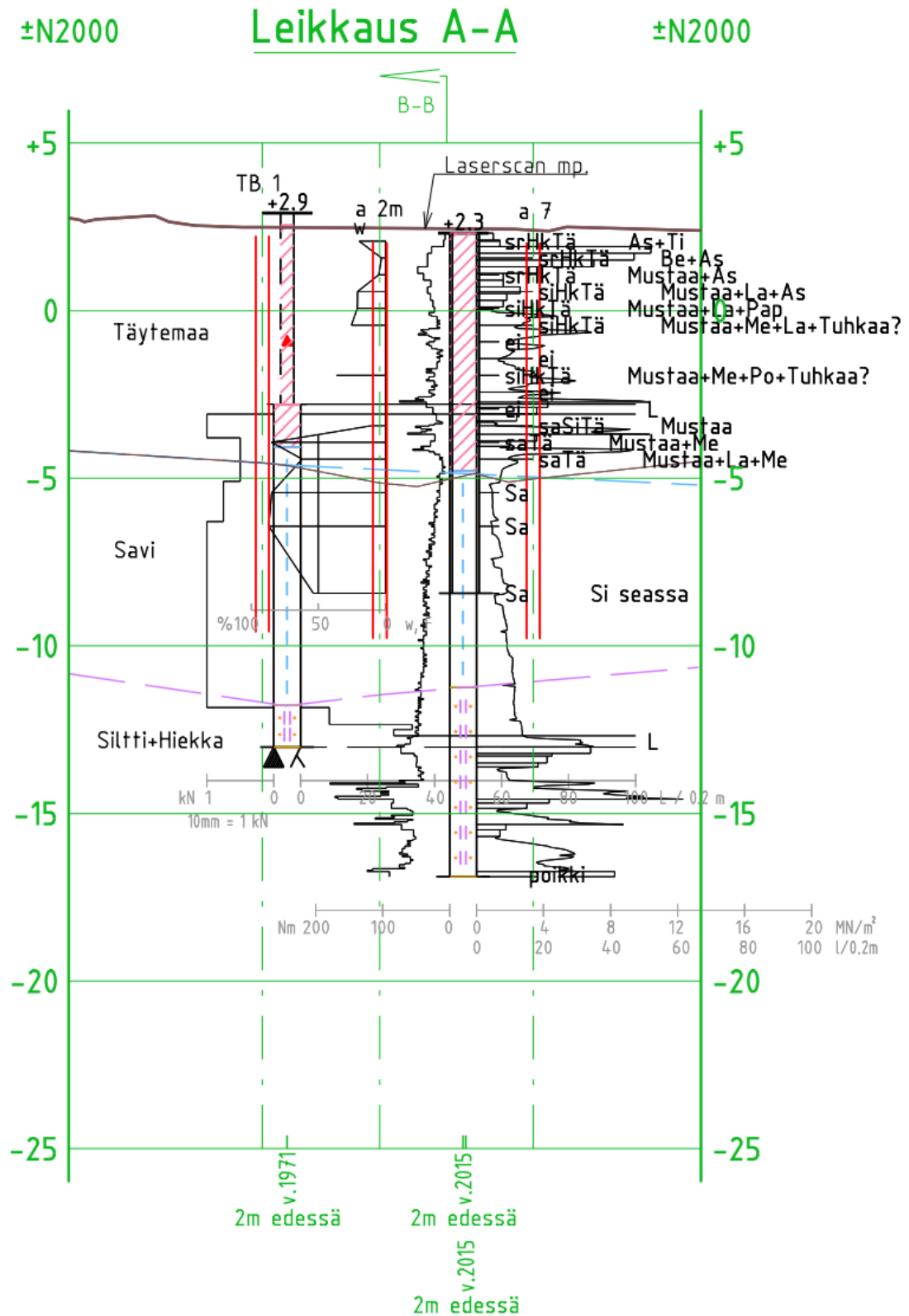


**Kuva 40.** Taulukon 32 mukainen rikin pitoisuuden kasvu mitaussyvyiden mukaan 50-luvun ja 60-luvun täytön paalutuspisteissä.

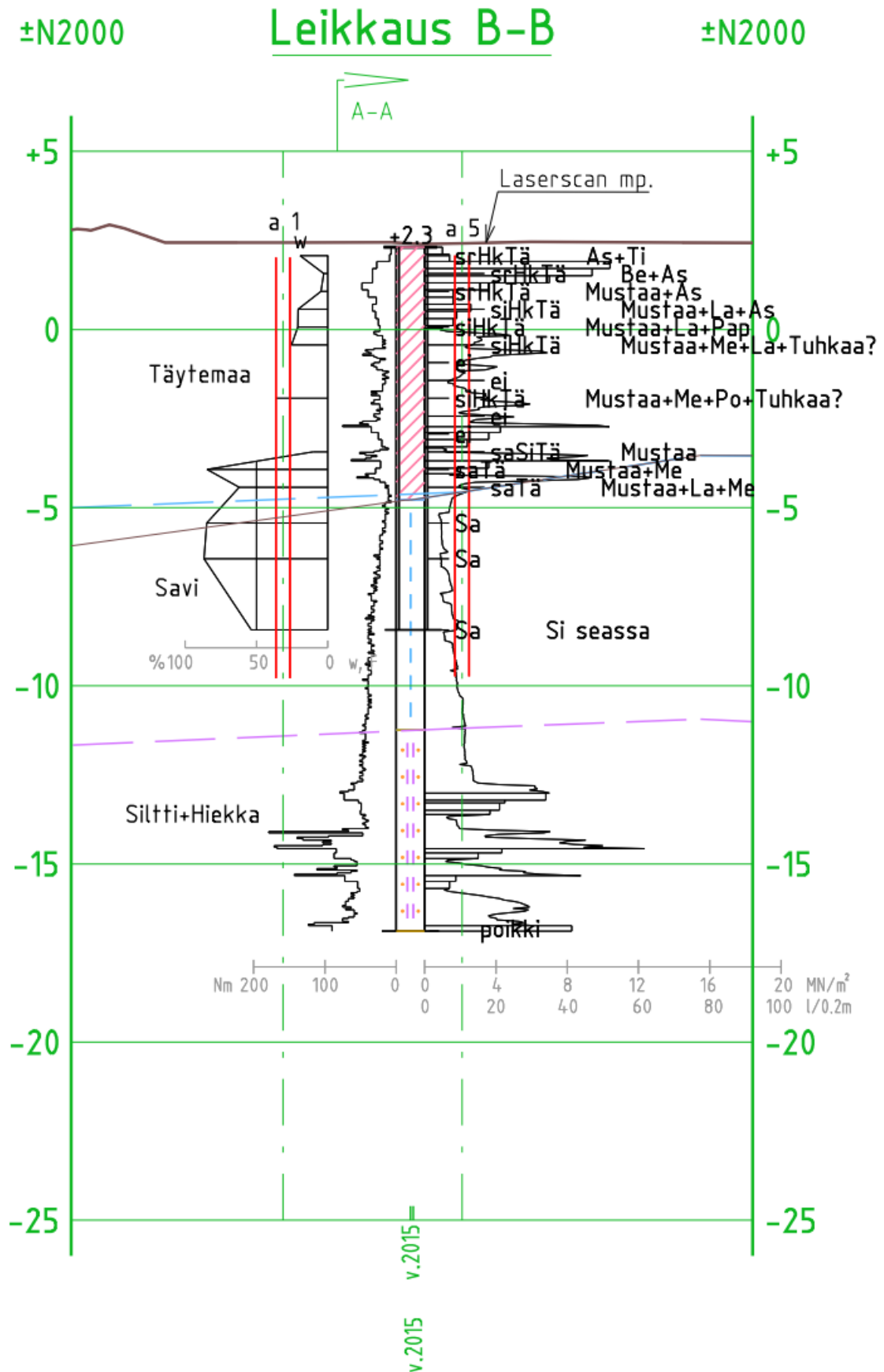
**Taulukko 41.** Paalutuspisteistä analysoidut maalajit.

Syvyys (m)	50-luku	60-luku	70-luku
0-0,5	sorainen hiekkatäyttö	sorainen hiekkatäyttö	sorainen hiekkatäyttö
0,5-1,0	sorainen hiekkatäyttö	sorainen hiekkatäyttö	sorainen hiekkatäyttö
1,0-1,5	sorainen hiekkatäyttö	sorainen hiekkatäyttö	sorainen hiekkatäyttö
1,5-2,0	silttinen hiekkatäyttö	sorainen hiekkatäyttö	silttinen hiekkatäyttö
2,0-2,5	silttinen hiekkatäyttö	-	siltti
2,5-3,0	silttinen hiekkatäyttö	-	hiekkainen siltti
3,0-3,5	-	savinen siltti	siltti
3,5-4,0	-	-	hiekkainen siltti
4,0-4,5	silttinen hiekkatäyttö	savi	savea ja hiekkaa
4,5-5,0	-	-	savea ja hiekkaa
5,0-5,5	-	savi	-
5,5-6,0	savinen siltitäyttö	-	-
6,0-6,5	savitäyttö	-	savi
6,5-7,0	savitäyttö	-	-
7,0-7,5	-	liejuinen savi	savi
7,5-8,0	savi	-	-
8,5-9,0	savi	-	-
9,0-9,5	-	-	liejuinen savi
10,5-11	savi	-	-

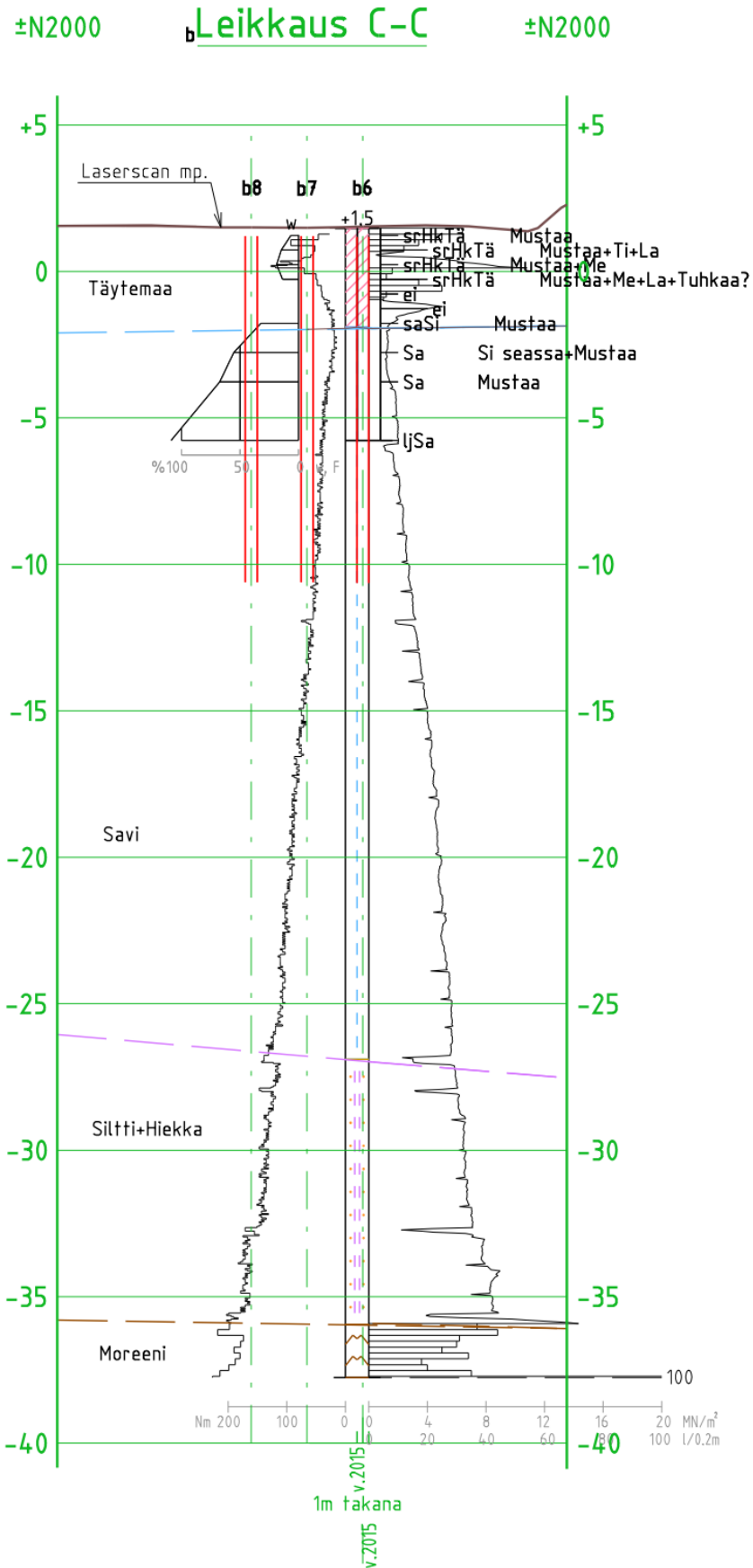
Taulukossa 41 esitettyjen maalajien lisäksi geoteknisessä analyysissä eriteltiin, jos näytteissä havaittiin jotain poikkeavaa. 50- ja 60-luvun täytöstä otetuista näytteistä löydettiin esimerkiksi tiiltä, lasia ja metallia. Paalutuspisteiden leikkauspiirrokset ovat esitetty kuvissa 41-44. Leikkausten suunnat on esitetty luvun 7.5 kuvissa 82-84.



**Kuva 41.** 50-luvun paalutuspisteen 1. leikkauspiirros.

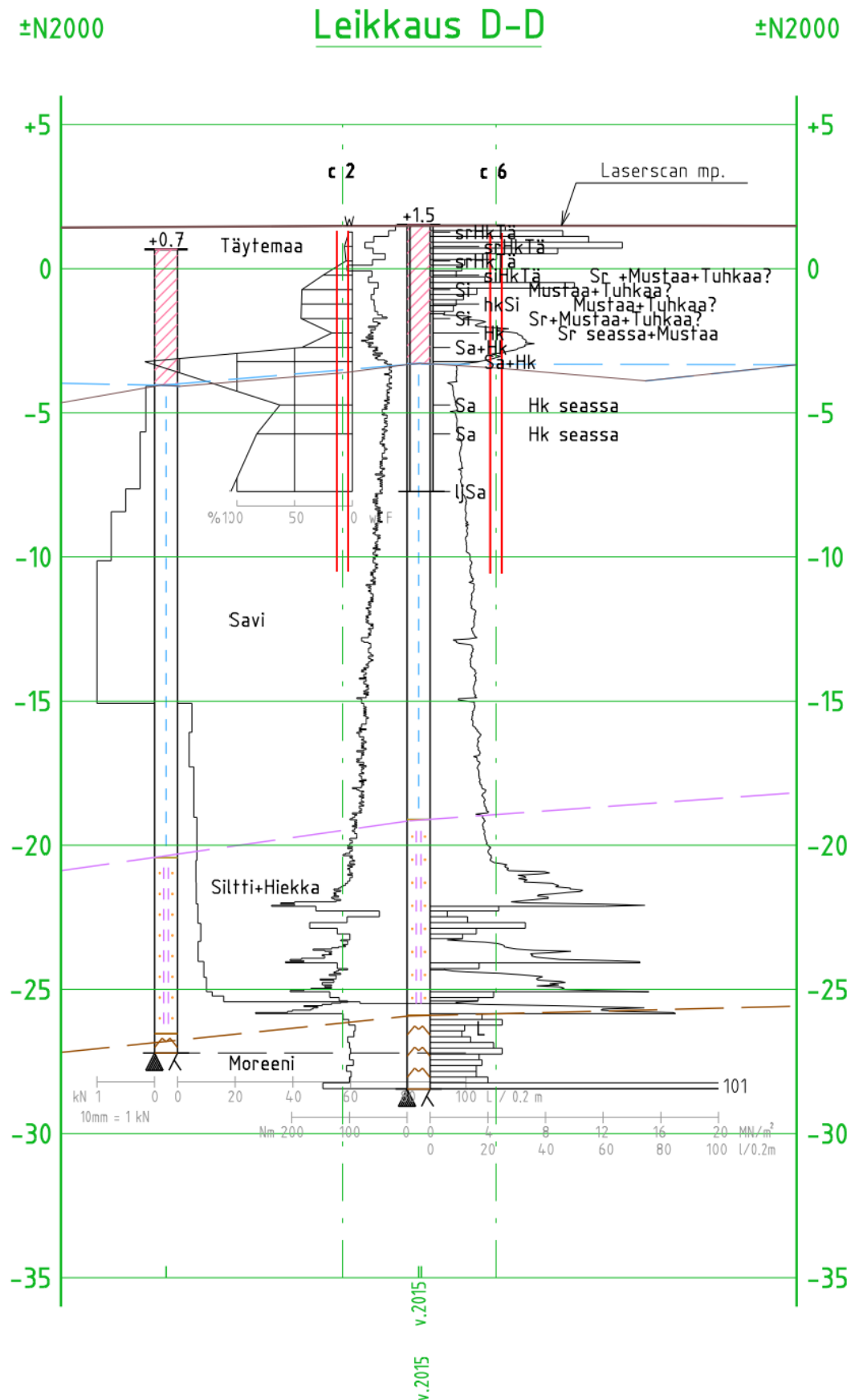


**Kuva 42.** 50-luvun paalutuspisteen 2. leikkauspiirros.



**Kuva 43.** 60-luvun paalutuspisteen leikkauspiirros.





**Kuva 44.** 70-luvun paalutuspisteen leikkauspiirros.

Paalutuspisteissä on ollut mahdollisesti tuhkatäyttöä, sillä tästä oli kirjattu havainto geoteknisten analyysien tuloksiin ja tämä käy ilmi myös kuvista 41-44. Lisäksi vielä useammin näytettä oli kuvailtu mustaksi, joka voi viitata sekä rikkipitoiseen maa-ainekseen että polttolaitostuhkaan.

**Taulukko 42.** 50-luvun maataytön korroosioanalyysituloksia.

Syvyys (m)	pH	Maalaji	S, liukoinen (mg/l)	$SO_4^{2-}$ (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Sähkönjohtavuus (mS/m)	Ominaisvastus (Ωm)
1-2	7,3	sorainen hiekkatäyttö / silttinen hiekkatäyttö	42	130	3,5	33	30
2-3	9,4	silttinen hiekkatäyttö	470	1400	200	91	11
4-4,5	8,7	silttinen hiekkatäyttö	54	160	11	49	20
6-7	8,9	savitäyttö	400	1200	300	130	7,7
7,5-11	7,5	savi	42	130	250	110	9,1

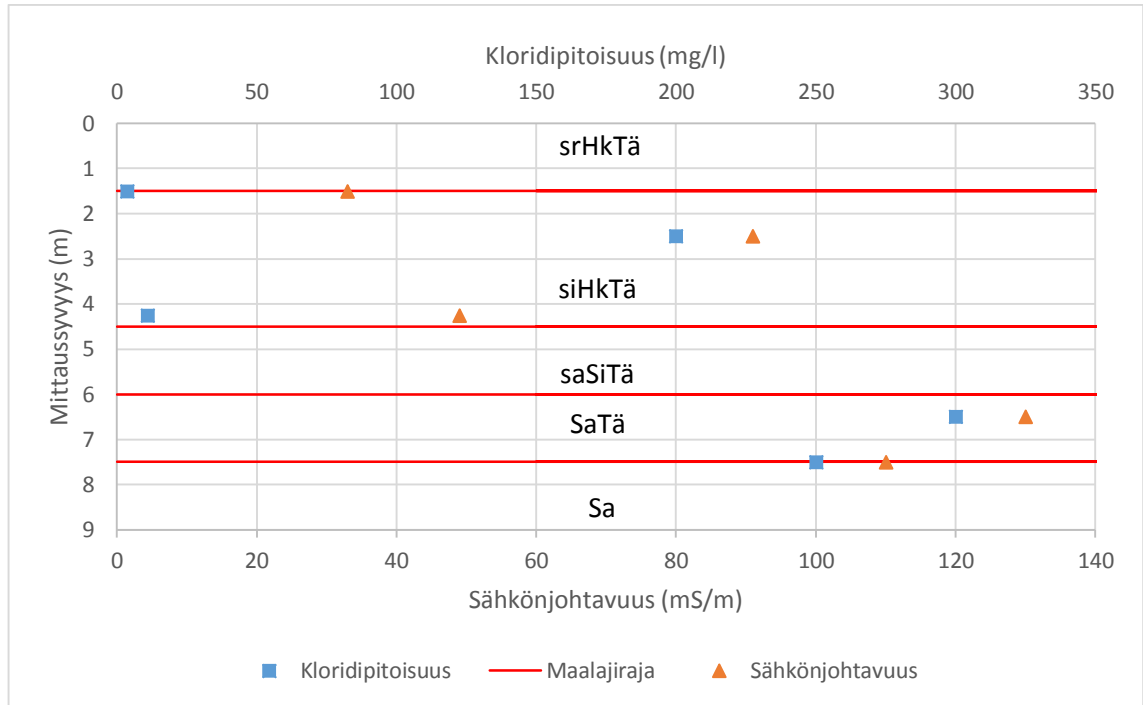
**Taulukko 43.** 60-luvun maataytön korroosioanalyysituloksia.

Syvyys (m)	pH	Maalaji	S, liukoinen (mg/l)	$SO_4^{2-}$ (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Sähkönjohtavuus (mS/m)	Ominaisvastus (Ωm)
0,5-2	8,5	sorainen hiekkatäyttö	36	110	3,9	31	32
3-3,5	8,1	savinen siltti	110	340	190	120	8,3
4-7,5	7,5	savi / liejuinen savi	47	140	240	110	9,1

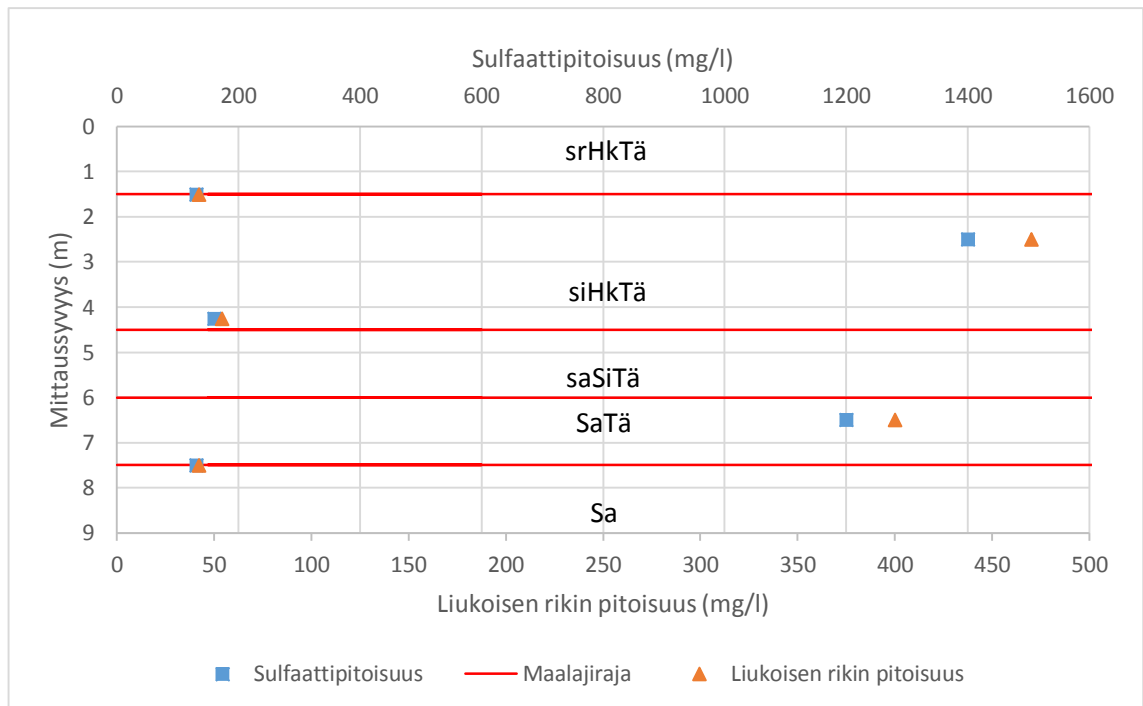
**Taulukko 44.** 70-luvun maataytön korroosioanalyysituloksia.

Syvyys (m)	pH	Maalaji	S, liukoinen (mg/l)	$SO_4^{2-}$ (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Sähkönjohtavuus (mS/m)	Ominaisvastus (Ωm)
1,5-2	7,7	silttinen hiekkatäyttö	15	46	0,66	20	50
2-3,5	11	siltti / hiekkainen siltti	170	500	2,8	110	9,1
6-9,5	8,1	savi / liejuinen savi	40	120	250	110	9,1

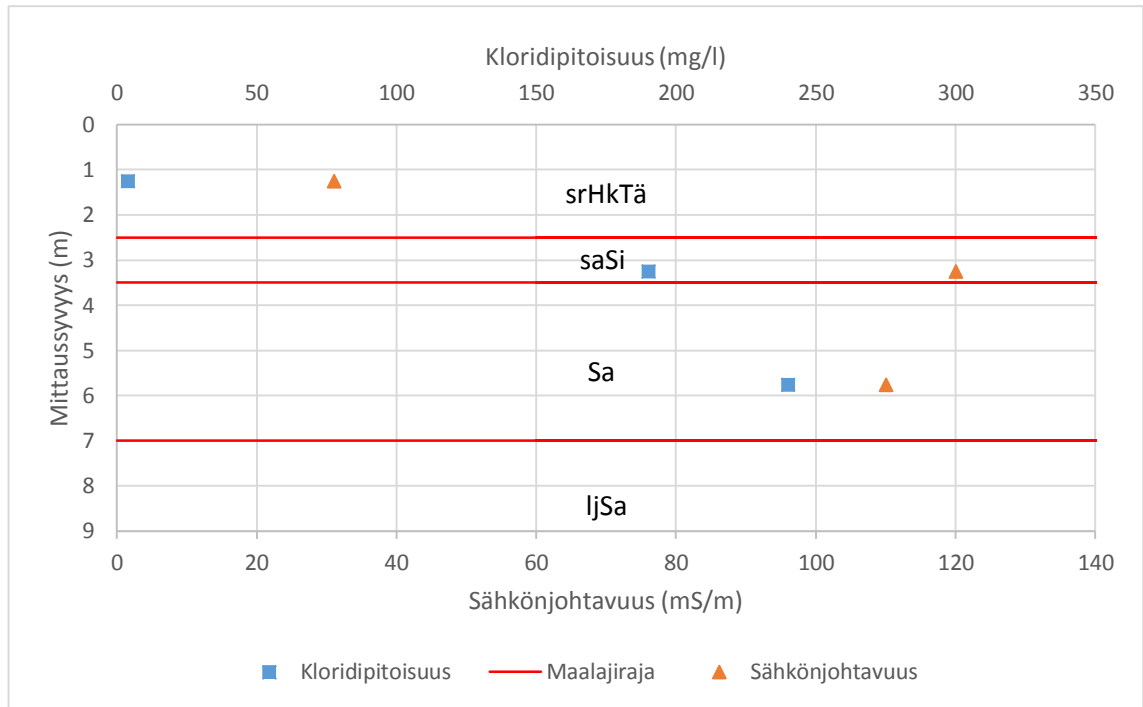
Kuvissa 45-50 on esitettyä taulukoiden 41-44 suureet graafisessa muodossa. Kuvissa esitetty mittaussyvyys on maanpinnasta mitattuna. Maalajien rajat on esitetty kuvissa yhtenäisellä vaakaviivalla ja käytetyt maalajien lyhenteet ovat luvussa 3.3.1 esitettyt GEO-luokituksen mukaiset lyhenteet.



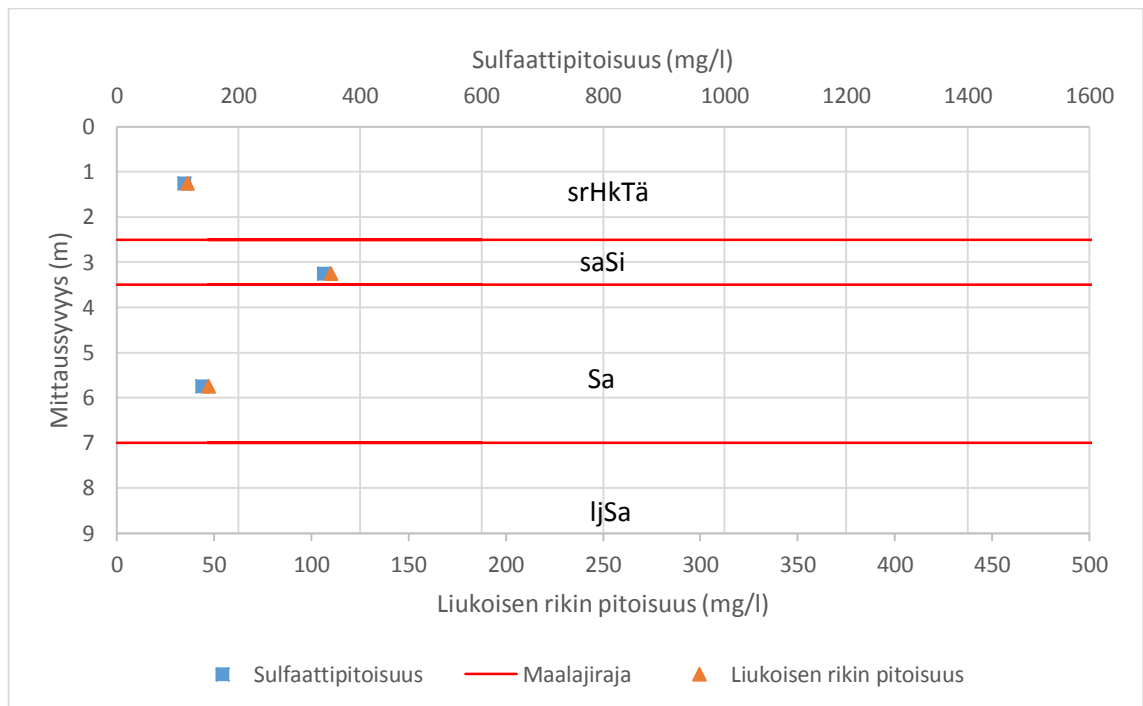
**Kuva 45.** Sähköjohtavuus ja kloridipitoisuus 50-luvun täytön paalutuspisteessä.



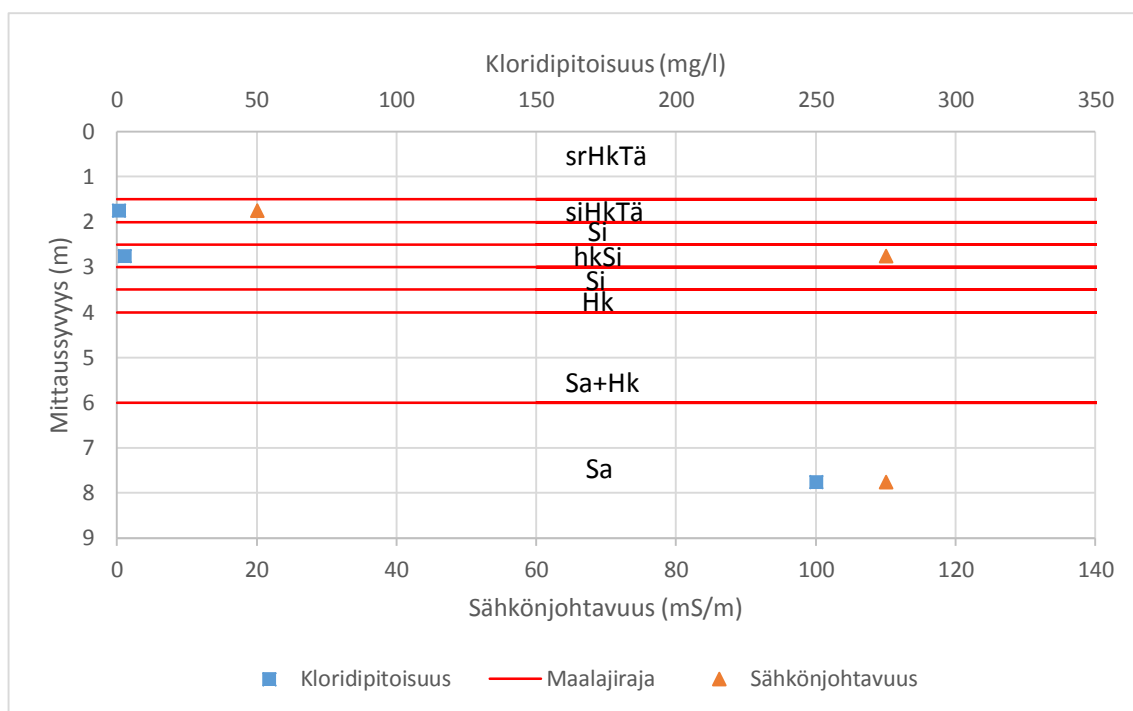
**Kuva 46.** Sulfaattipitoisuus ja liukoisen rikin pitoisuus 50-luvun täytön paalutuspisteessä.



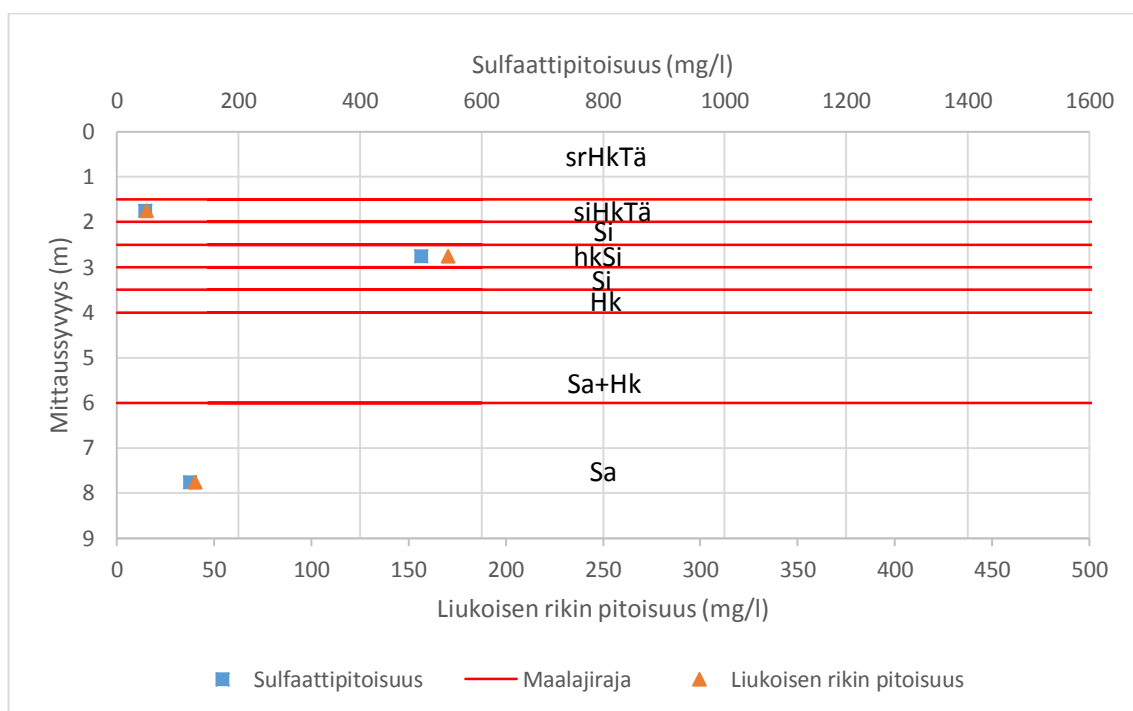
**Kuva 47.** Sähkönjohtavuus ja kloridipitoisuus 60-luvun täytön paalutuspisteessä.



**Kuva 48.** Sulfaattipitoisuus ja liukoisien rikin pitoisuus 60-luvun täytön paalutuspisteessä.



**Kuva 49.** Sähkönjohtavuus ja kloridipitoisuus 70-luvun täytön paalutuspisteessä.



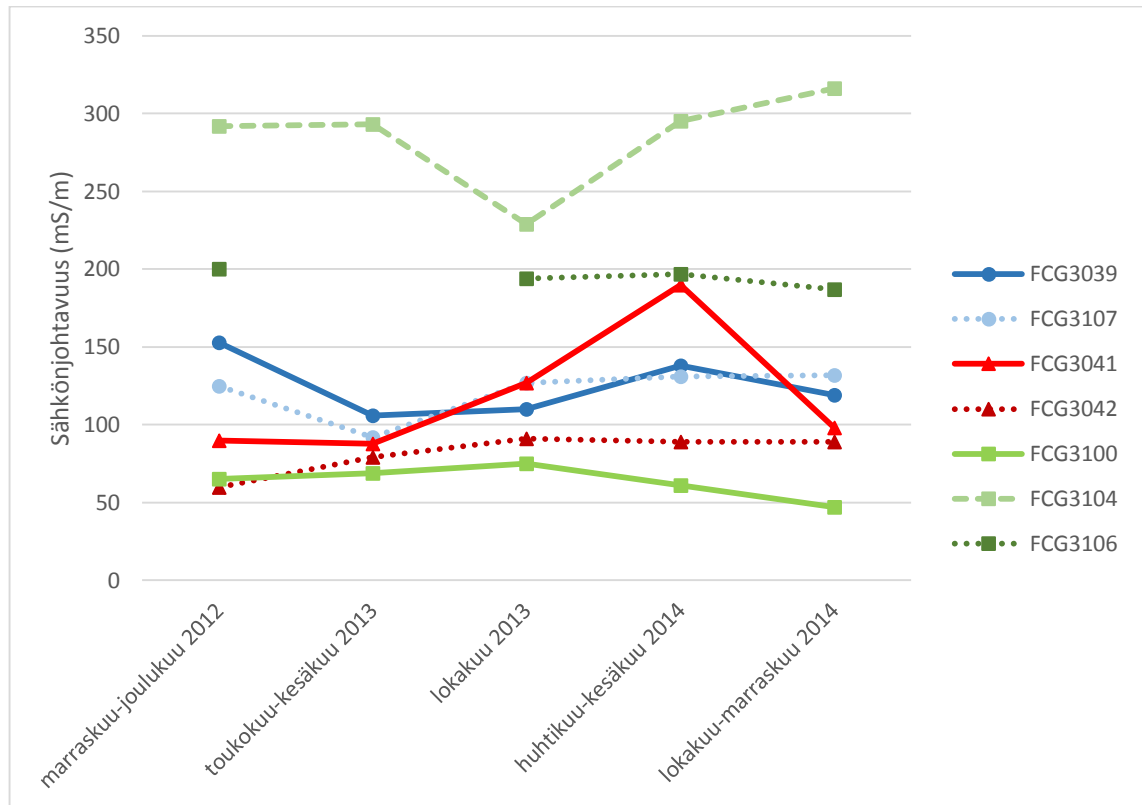
**Kuva 50.** Sulfaattipitoisuus ja liukoisin rikin pitoisuus 70-luvun täytön paalutuspisteessä.

## 7.1.4 Orsivesi Kyläsaarella

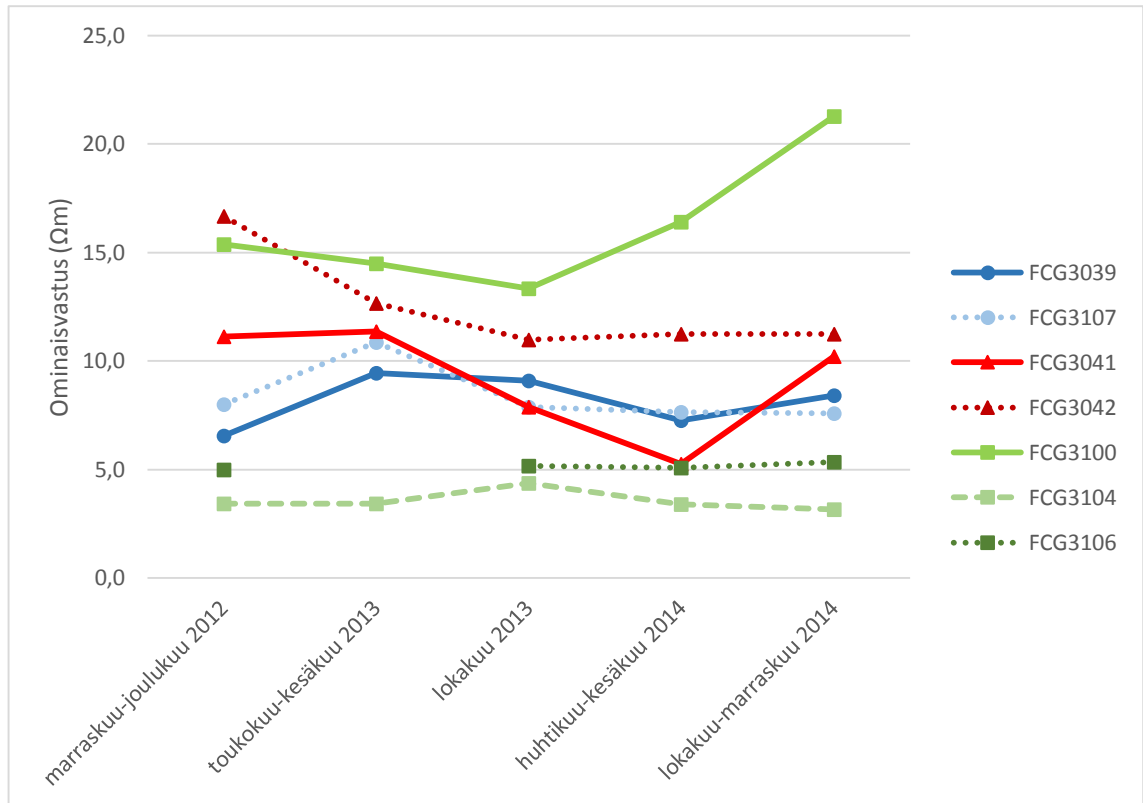
FCG Finnish Consulting Group on tehnyt Kyläsaaren alueella vesimittauksia Helsingin kaupungille seurantatutkimuksena kevään 2012 ja syystalven 2014 välisenä aikana. Näissä tutkimuksissa korroosiotutkimuksen kannalta kiinnostavia parametreja ovat olleet

orsiveden sähkönjohtavuus, sulfaatti-ionipitoisuus ja pH-arvo. Orsivedellä tarkoitetaan pohjavesipinnan yläpuolella esiintyvää ja jonkin muuta maaperää hienompirakeisen, al-  
lasmaisen maakerrostuman päällä lepäävää vettä [122].

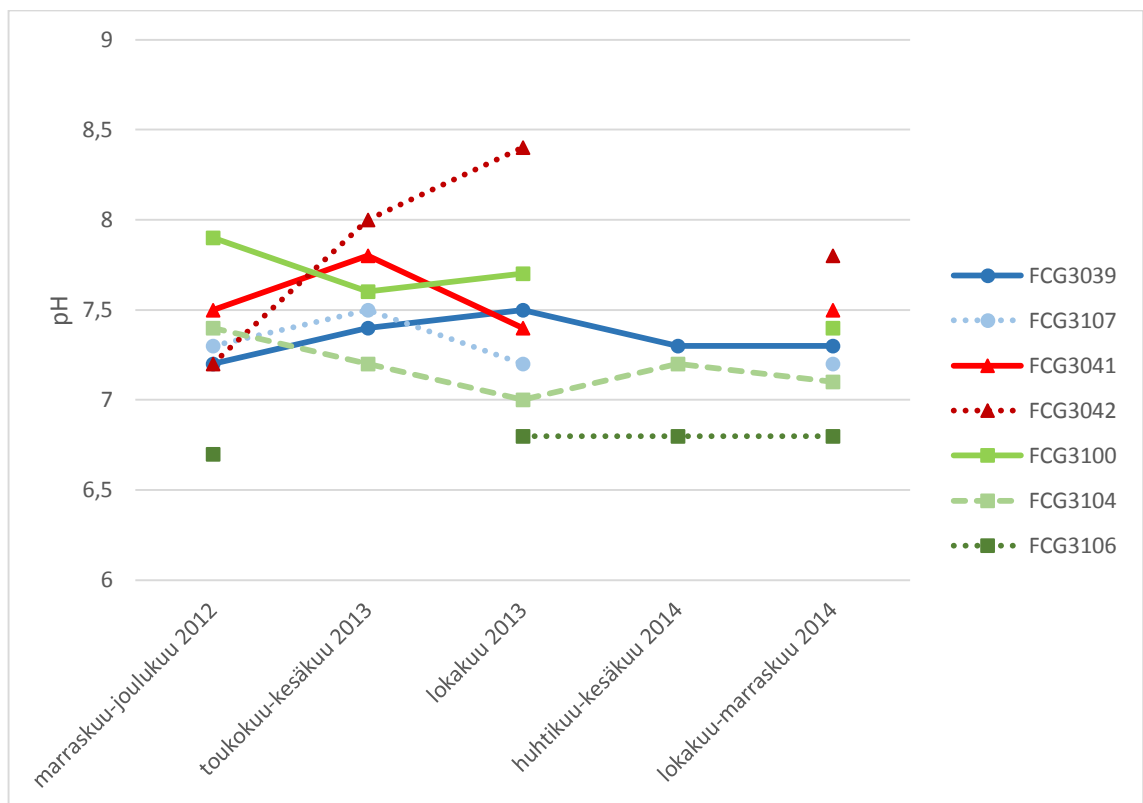
Korroosiotutkimuksen kannalta vesimittausten tärkeimmät tulokset on esitetty kuvissa 51-54. Kuvissa siniset käyrät edustavat arvioidun 50-luvun läjityksen alueella olevia mit-  
tauspisteitä, punaiset arvioidun 60-luvun läjityksen mittauspisteitä ja vihreät arvioidun 70-luvun läjityksen mittauspisteitä.



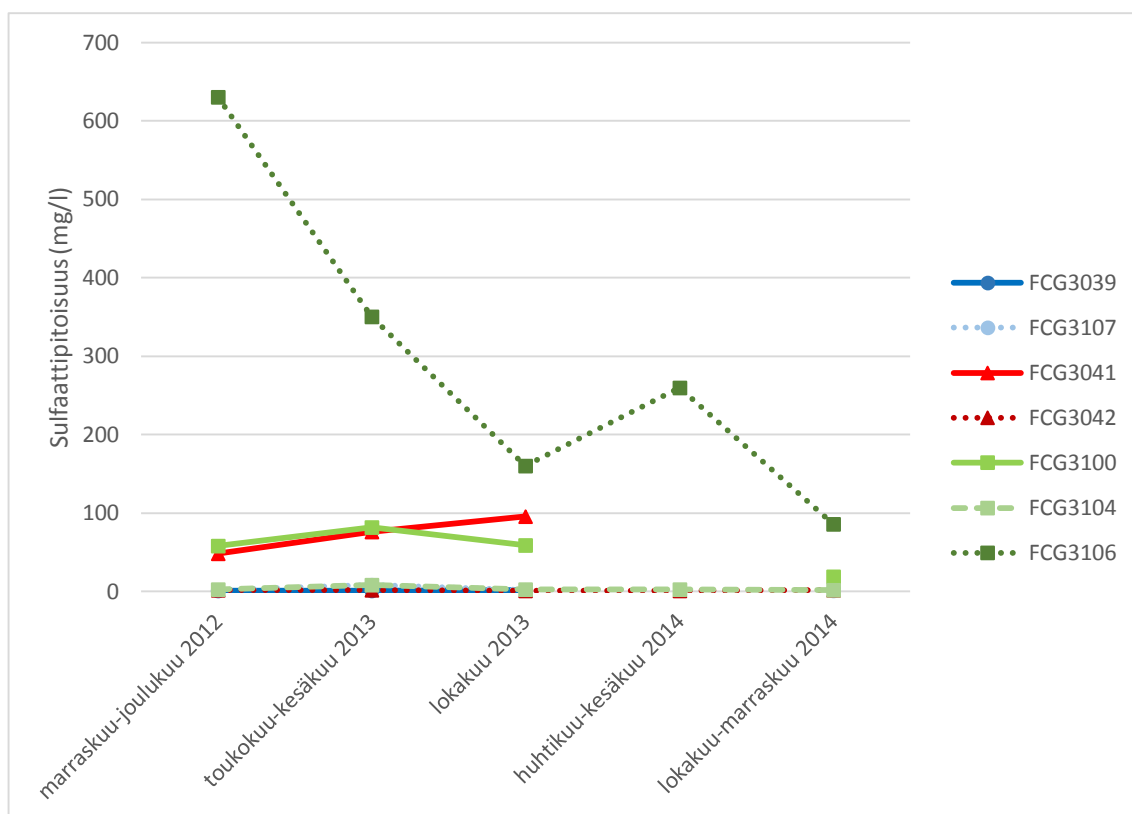
**Kuva 51.** Kyläsaaren orsiveden sähkönjohtavuuden vaihtelu 2012-2014.



**Kuva 52.** Kyläsaaren orsiveden sähkönjohtavuus ominaisvastukseksi muunnettuna.



**Kuva 53.** Kyläsaaren alueen orsiveden pH-vaihtelu syystalven 2012 ja syystalven 2014 välillä.



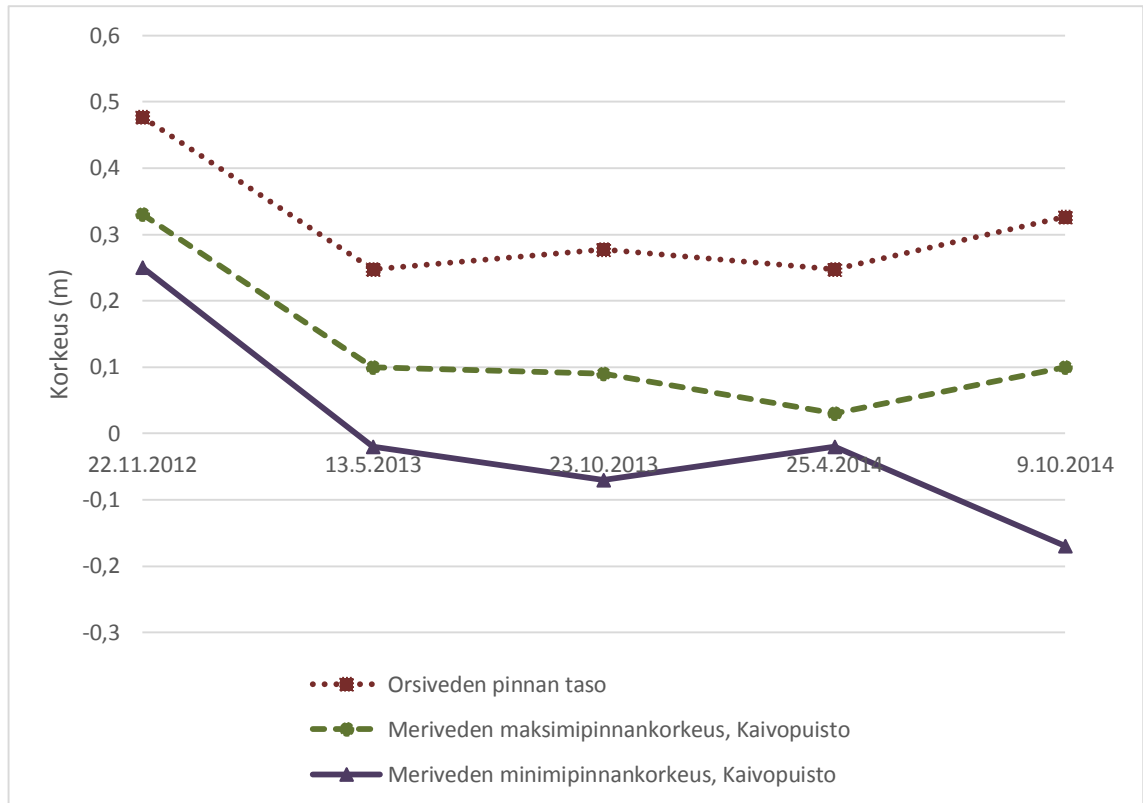
**Kuva 54.** Kyläsaaren alueen orsiveden sulfaattipitoisuuden vaihtelu syystalven 2012 ja syystalven 2014 välillä.

Kuvasta 51 nähdään, että sähkönjohtavuus vaihtelee 50-300 mS/m välillä. Vastaavasti tällöin orsiveden ominaisvastus vaihtelee 3-21  $\Omega$ m, kuten kuvasta 52 ilmenee. Laatusuositus vedelle on 250 mS/m ja esimerkiksi Tukholman satamassa tehdyissä korroosiotutkimuksissa veden sähkönjohtokyky on ollut 125-626 mS/m mittauspisteestä riippuen [53]. Kuvasta 51 nähdään, että sähkönjohtavuus vaihtelee samassa mittauspisteessä jopa 100 mS/m mittausajankohdasta riippuen.

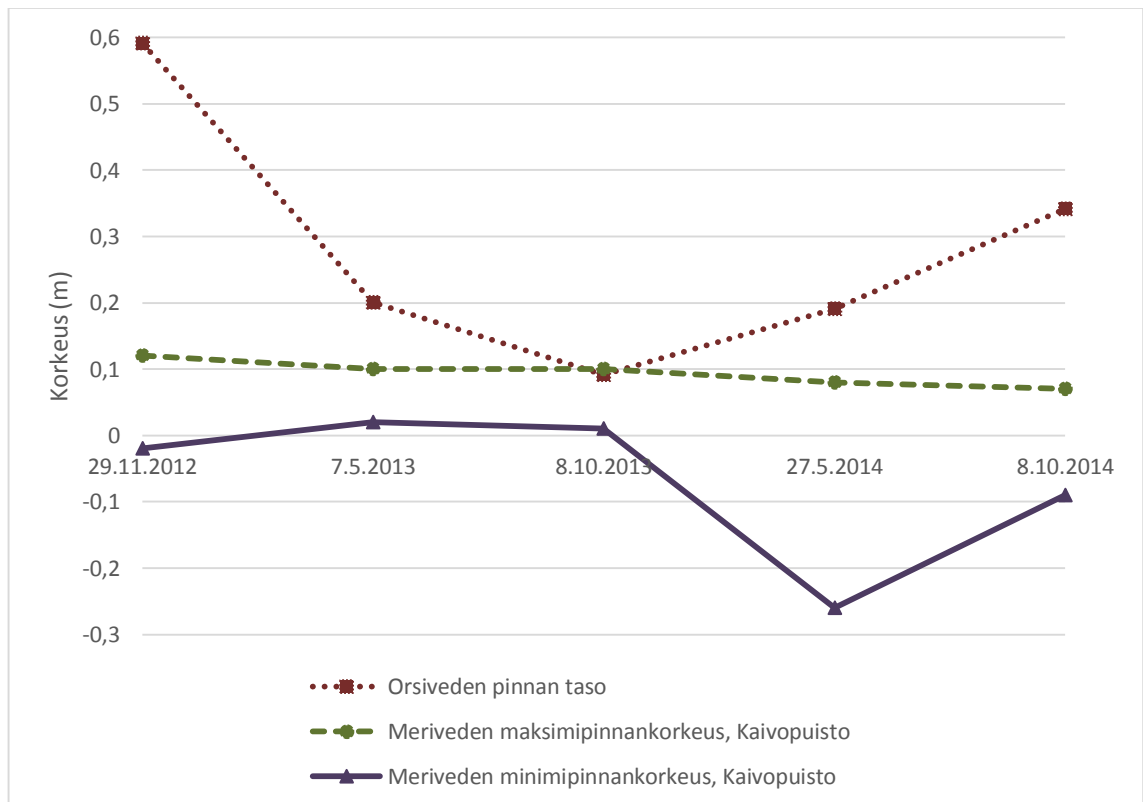
Kyläsaaren alueen orsiveden pH-arvo vaihtelee 6,7-8,4 välillä, kuten kuvasta 53 käy ilmi. Tutkimuspisteiden arvojen vaihtelu mittausajankohdan mukaan on hyvin vähäistä. Kyläsaaren orsiveden pH vastaa pääsääntöisesti Suomen rannikon meriveden pH-arvoja [15].

Orsiveden sulfaattipitoisuus on pääsääntöisesti hyvin pientä. Poikkeuksena tähän on kuvassa 54 yksi 70-luvun mittauspisteistä, jossa sulfaatti-ioneja on mitattu korkeimmillaan 630 mg/l. Tämä orsivesipiste sijaitsee 70-luvun läjityksen reuna-alueella noin 50 m päässä Vanhankaupungin selälle virtaavasta purosta. Alueella on ollut rakennustoimintaa hyvin lyhyt aika ennen ensimmäistä vesimittausa, joten tämän toiminnan epäillään vaikuttaneen tuon mittauspisteen tuloksiin.





**Kuva 55.** Orsiveden pinnan tason vaihtelu mittauspisteessä FCG3042 suhteessa meriveden pintaan.



**Kuva 56.** Orsiveden pinnan tason vaihtelu mittauspisteessä FCG3041 suhteessa meriveden pintaan.

Kuvissa 55 ja 56 on esitettyä vesinäytepisteiden FCG3042 ja FCG3041 orsiveden pinnan vaihtelu suhteessa meriveden pinnankorkeuteen. Vesinäytepiste FCG3042 sijaitsee noin 35 m päässä 60-luvun täytön paalutuspisteestä (piste B kuvassa 37) ja vesinäytepiste FCG3041 noin 30 m päässä 70-luvun täytön paalutuspisteestä (piste C kuvassa 37). Kuvassa 37 nämä vesinäytepisteet ovat merkitty sinisinä ympyröinä.

Kuvan 55 perusteella voisi olettaa, että meriveden pinnankorkeus suoraan korreloisi orsiveden pinnan tasoon, mutta kun huomioidaan kuva 56, ei tätä korrelaatiota ole tai se on huomattavasti heikompi kuin pelkän kuvan 55 nojalla. Kuvien 55 ja 56 orsiveden pinnan tason vaihtelua on myös vaikea yhdistää kuvissa 51-54 esitettyihin mittaustuloksiin ja niiden vaihteluihin, sillä selkeää korrelaatiota ei ole nähtävissä.

Silmämääräisesti arvioituna kaikki alueelta tätä diplomityötä varten otetut orsivesinäytteet eivät olleet erityisen puhtaita vaan sameita ja väriltään ruskeahkoja. Vesinäytteet ovat esitettyä kuvassa 57 ja tarkemmin erlenmeyerpulloissa kuvassa 58. Vesinäytteiden keskinäiset värierot ovat selkeät kuvassa 58.



**Kuva 57.** Kyläsaaren korroosiotutkimusalueelta otetut vesinäytteet.



**Kuva 58.** Kyläsaaren vesinäytteet lähempää tarkasteltuna.

Kyläsaaren korroosiotutkimuksen yhteydessä asennettiin 50-luvulla täytetyille alueelle uusi vesinäytteenottoputki, joka sijaitsee kuvan 37 osoittamassa pisteessä A. Tästä putkesta otettu vesinäyte on kuvissa 57 ja 58 esitetty Hermann 010. Vesinäyte analysoitiin marraskuussa 2015 Novalab Oy:n laboratoriossa ja korroosiotutkimuksen kannalta keskeisiä tuloksia on esitetty taulukossa 45. Kaikki mittaustulokset on esitetty liitteessä 2.

**Taulukko 45.** Uudesta vesinäytepisteestä 010 Hermann tehdyn analyysin tuloksia.

pH	Sähkönjohtavuus (mS/m)	Ominaisvastus ( $\Omega$ m)	$SO_4^{2-}$ -pitoisuus (mg/l)
12	230	4,3	250

Uudesta mittapisteestä otetun vesinäytteen kaikki taulukossa 45 esitetyt arvot ovat yleisesti korkeita verrattuna edellä esitettyihin alueella tehtyihin pitkäaikaismittauksiin. Näytteenottoputken asennus on voinut saada maa-aineksesta liikkeelle liukenevia yhdisteitä, jotka näkyvät korkeina sähkönjohtavuus- ja sulfaattipitoisuusarvoina.

Hyvin emäksinen pH on äärimmäisen poikkeava, kun alueen vesinäytteiden pH on ollut yleisesti neutraalia tai vain lievästi emäksistä. Tässäkin on syytä epäillä sitä, että otettuun vesinäytteeseen on putken asentamisesta johtuen liennut jotain poikkeavaa kuten tuhkatäytön elementtejä.

## 7.2 Paalujen käsittely ja identifiointi

Tässä työssä pitkäaikaistutkimusta varten valmisteltuja ja dokumentoituja teräsputkipaaluelementtejä oli yhteensä 50, joista 25 pidettiin täysin toimitustilaisina ja 25 maalattiin epoksimaalilla. Maalaus tehtiin piirin puolikkaalle. Yksi maalaamaton ja yksi maalattu

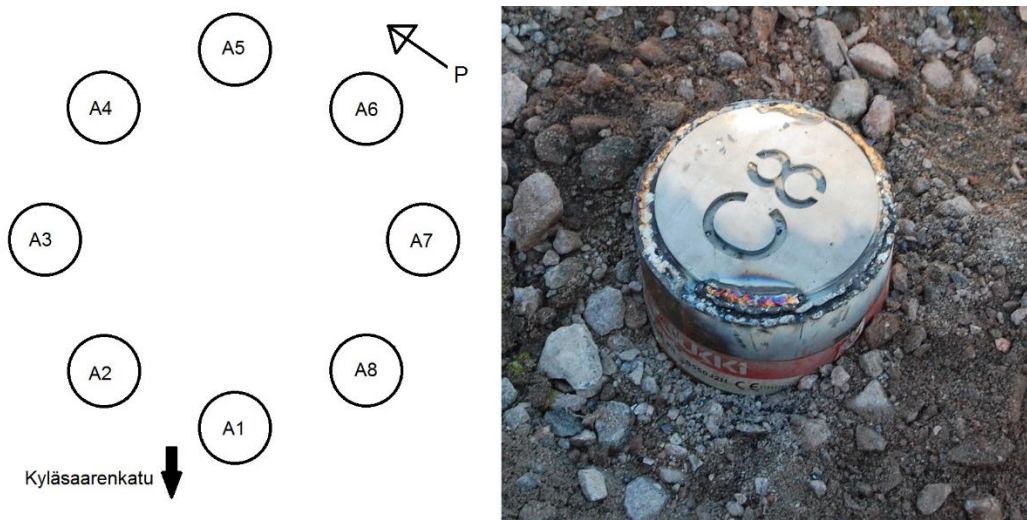
paaluelementti toimitettiin Tampereen teknilliselle yliopistolle säilytettäväksi referenssi-paaluna ja loput 48 elementtiä lyötiin maaperään lokakuussa 2015 kolmessa eri mittaus-paikassa Helsingin Kyläsaareissa.

Paalutustyötä edeltävien mittausten ajan teräspalkkipaalut olivat numeroituina juoksevasti 1-50 siten, että ensimmäiset 25 olivat maalattavia ja jälkimmäiset 25 maalaamattomia putkipaaluja. Paaluista numerot 1 ja 26 jäivät referenssikappaleiksi TTY:lle. Nämä numeroinnit ovat mittaustuloksissa esiintyviä paalutunnisteita.

Numerot merkittiin paaluihin vahaliidulla ja varmuuden varaksi stanssattiin jokaisen paaluelementin jatkokseen. Paalutustyön yhteydessä todettiin, että iskuvasaran osuma tuhoaa myös stanssausjäljen lähes kokonaan, ja voidaan myös olettaa, että väliaikaiseksi tarkoitettavat vahaliitumerkinnät eivät säily asennuksessa tapahtuvan hankautumisen tai ympäristöolosuhteiden vuoksi. Näin ollen paalujen asennusvaiheessa tehty kirjanpito numeroinneista korostuu suhteessa paalutussijaintiin.

Varsinaisella paalutustyömaalla jokaiseen kolmeen mittauspaikkaan lyötiin kahdeksan 12 metristä paalua koostuen aina kahdesta näistä elementistä. Koepaalutuspaikat on esitetty aiemmin kuvassa 37.

Maahan asennettaessa jokaisen paaluelementin sijainti kirjattiin ja kaksi elementtiä sidottiin yhteen uuteen tunnuksen joka koostui A-, B- tai C-kirjaimesta mittauspaikan mukaan ja juoksevasta numerosta 1-8. Tämän tunnuksen mukainen ruostumattomasta teräksestä tehty merkintäkiekko hitsattiin jokaisen paalun ylemmän elementin jatkokseen. Tunnusten käyttöä esittävä piirros ja maahan lyötyyn paaluun hitsattu merkintäkiekko ovat kuvassa 59. Ilmansuuntanuoli kuvassa 59 on tarkoitettu suuntaa-antavaksi. Merkintäperiaate tutkimuspaikalla on esitettyinä luvun 7.5 kuvassa 81 ja paaluelementtien sidonnat näihin tunnuksiin kyseisen luvun taulukossa 57.



**Kuva 59.** Koepaalutusten merkintäperiaate ja asennettuun paaluun hitsattu tunnistelevy.

Tampereen teknilliselle yliopistolle toimitettiin kaksi kuuden metrin referenssipaaluelementtiä, joista toinen oli toimitustilainen ja toinen maalattu. Referenssielementit ovat peräisin samasta valssaus- ja valmistuserästä kuin maahan lyödyt paalut ja ne ovat valikoituneet referensseiksi täysin satunnaisesti. Valmistuserän teräksen koostumus ja koetustulokset on esitetty liitteessä 4.

Tampereen teknillisellä yliopistolla referenssipaaluelementit sahattiin vannesahalla lyhemmiksi osiksi tehtävien mittausten helpottamiseksi. Sahatut kappaleet olivat kaksi kahden metrin kappaletta sekä lyhempi 160 cm osa, sillä kolmannelle kahden metrin palasta leikattiin irti hitsattu jatkos ja 20 cm lieriö optista profilometriä varten.

Teräsputkipaalujen lisäksi Helsingin kaupungin Kyläsaarella tekemään pitkäaikaistutkimukseen kuului teräsbetonipaaluja. Näitä teräsbetonipaaluja ei kuitenkaan käsitellä tässä diplomityössä, vaan niistä on olemassa erillinen selvitys. Ne on kuitenkin kokonaistutkimuksen yhtenäisyyden kannalta syytä mainita. Teräsbetonipaaluille tehdystä selvityksestä, joka on tämän työn liitteenä 5, käy ilmi muun muassa niiden referenssikappaleille tehdyt kimmovasaramittaukset. Myös teräsbetonipaalujen referenssit ovat Tampereen teknillisellä yliopistolla säilytyksessä jatkotutkimuksia varten.

## **7.3 Paalutusta edeltävät mittaukset**

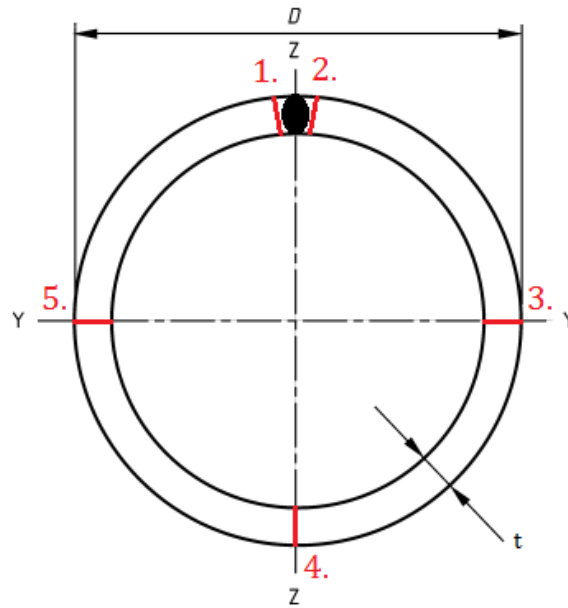
Ennen paalutustyötä kaikista paaluista mitattiin seinämävahvuus niiden jatkoksettomasta päästä. Tämän lisäksi otantakohtaisesti paaluista mitattiin niiden halkaisijamitat tasaisin välein ja epoksimaalilla maalatuista pinnoitepaksuus.

Tampereen teknilliselle yliopistolle toimitetuista kahdesta referenssipaalusta mitattiin näiden lisäksi metripaino, tutkittiin pinnan ominaisuuksia optisella profilometrillä, määritettiin eri vesiliuoksilla niistä polarisaatiokäyrät sekä kuvattiin pintaa laserskannauksen avulla.

### **7.3.1 Seinämävahvuusmittaus**

Kyläsaaren maaperään lyötävistä putkipaaluelementeistä mitattiin niiden seinämävahvuudet. Tämä tehtiin, jotta paalujen jatkotutkimuksessa vuonna 2017 ja myöhemmin voidaan verrata syöpyneiden paalujen mittoja alkuperäisiin mittoihin. Näin korroosiotutkimuksessa saadaan tarkempia tuloksia kuin vertaamalla maahan lyötyjen paalujen mittaus-tuloksia paalujen toimittajan ilmoittamiin tietoihin.

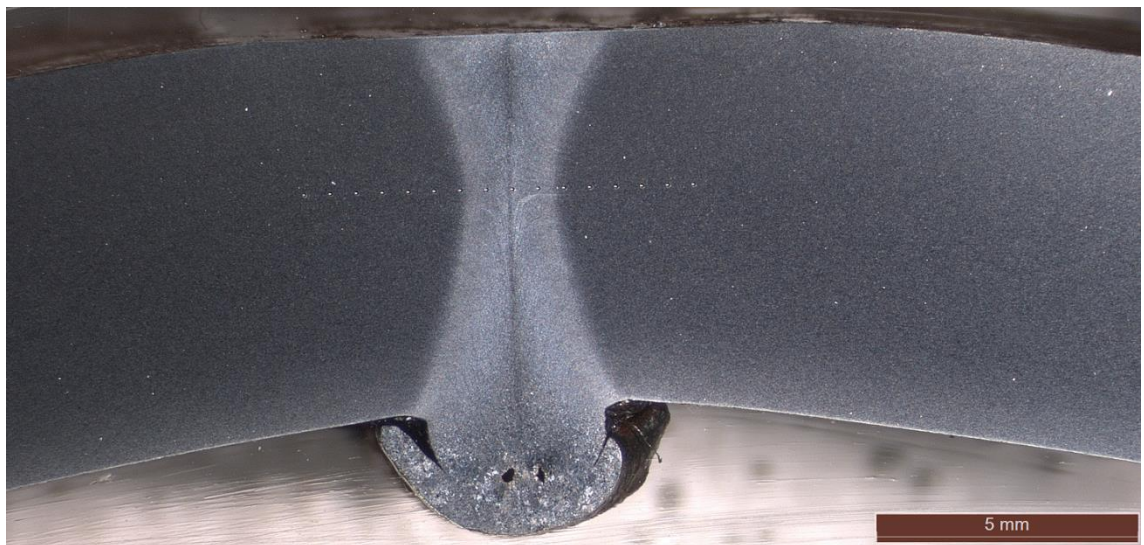
Seinämävahvuusmittaukset tehtiin jokaisen putkielementin päästä viidestä eri mittapistestä: hitsisauman vierestä molemmilta puolilta sekä 90°, 180° ja 270° saumasta myötäpäivään katsottuna. Mittauspisteet putken poikkiprofilissa ovat numeroituina kuvassa 60.



**Kuva 60.** Seinämävahvuuksien mittauspisteet ja suureita, muokattu lähteestä [81].

Rakenneputkia koskevan standardin mukaan putken seinämävahvuus kuuluu mitata putkesta kohdasta, joka on etäisyydeltään vähintään kaksi kertaa tämän vahvuuden päässä hitsaustaumasta [81]. Tässä työssä tehdyistä mittauksista kolme oli tällä etäisyydellä, mutta hitsisauman vierestä tehdyt mittaukset luonnollisestikaan eivät olleet.

Hitsisauman viereiset mittaukset kuitenkin koettiin työn kannalta tärkeiksi, sillä hitsauksen myötä paalun poikkileikkauksen mikrorakenne tältä alueelta voi poiketa muusta paalusta ja voi olla muuta paalua alttiimpi korroosion vaikutukselle. Hitsisauman alueen mikrorakenteen eroaminen perusaineesta on esitettyä kuvassa 61.



**Kuva 61.** Stereomikroskooppikuva paalun hitsisauman ympäristöstä. Teräsnäytettä on syövytetty 10 sekuntia 4 % Nital-liuoksessa.



Seinämävahvuuksien mittaamiseen käytettiin mikrometriruuvia, jonka luentatarkkuus oli 0,01 mm eli luentavirhe  $\pm 0,005$  mm. Mittaustoimenpide on esitettyä kuvassa 62.



**Kuva 62.** Seinämävahvuuden mittaaminen maalausta varten puhalletusta paalusta.

Seinämävahvuusmittausten tulokset ovat esitettyinä taulukoissa 46 ja 47. Mittauspisteet ovat kuvassa 60 esitetyn mukaiset. Maalaamattomia ja maalattuja paaluja oli molempia 25 kappaletta, joten tulokset esitetään tässä niiden keskiarvoina ja keskihajontoina. Teräsputkipaalujen yksityiskohtaiset mittaustulokset on esitetty liitteessä 6.

**Taulukko 46.** Maalattujen paalujen seinämävahvuus hiekkapuhallettuina ilman maalia.

	Piste 1 (mm)	Piste 2 (mm)	Piste 3 (mm)	Piste 4 (mm)	Piste 5 (mm)
<b>Keskiarvo</b>	7,73	7,76	7,88	7,84	7,85
<b>Keskihajonta</b>	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03

**Taulukko 47.** Maalaamattomien paalujen seinämävahvuudet hiekkapuhaltamattomina.

	Piste 1 (mm)	Piste 2 (mm)	Piste 3 (mm)	Piste 4 (mm)	Piste 5 (mm)
<b>Keskiarvo</b>	7,75	7,76	7,89	7,88	7,89
<b>Keskihajonta</b>	0,16	0,15	0,03	0,03	0,03

Maalattujen ja maalaamattomien paalujen välillä ei ollut juurikaan eroa seinämävahvuustuloksissa. Taulukoissa 46 ja 47 selkein ero on maalaamattomien paalujen hitsisauman molemmiin puolin olevien mittapisteiden keskihajonta-arvossa. Tämä johtuu siitä, että kaksi mitatuista paaluelementeistä, tunnistenumerot 44 ja 50, olivat seinämäpaksuudeltaan selvästi muita ohuempia tästä kohdasta.

Todennäköisin syy näille ohuemmille seinämäpaksuuksille on putkien raaka-aineena käytettävien teräsnauhojen valmistusprosessi. Tällaisten poikkeavuuksien esiintyminen on tavallista valmistusmenetelmällä tehdyille paaluille tai putkille. Jos nämä kaksi paaluelementtiä jätetään kokonaan huomioimatta, saadaan taulukossa 48 ilmoitetut tulokset.

**Taulukko 48.** *Maalaamattomien paalujen seinämävahvuudet hiekkapuhaltamattomina ilman paaluelementtejä 44 ja 50.*

	Piste 1 (mm)	Piste 2 (mm)	Piste 3 (mm)	Piste 4 (mm)	Piste 5 (mm)
<b>Keskiarvo</b>	7,79	7,80	7,89	7,88	7,89
<b>Keskihajonta</b>	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03

Taulukosta 48 voidaan todeta, että maalaamattomien paaluelementtien mittauspisteiden 1 ja 2 keskihajonta-arvot ovat ilman paaluelementtejä 44 ja 50 suuruudeltaan samat kuin taulukossa 46 esitetyt. Elementtien 44 ja 50 selvästi pienempi seinämävahvuus näissä mittauspisteissä näkyy seinämävahvuuden keskiarvon kasvuna taulukossa 48 verrattuna taulukkoon 47. Muiden mittauspisteiden arvoissa näiden kahden paaluelementin hylkääminen ei näy eli nämä arvot olivat myös paaluelementeissä 44 ja 50 samaa suuruusluokkaa kuin muissa maalaamattomissa ja hiekkapuhaltamattomissa elementeissä.

**Taulukko 49.** *Maalaamattoman referenssielementin (tunnistenumero 26) tulokset.*

	Piste 1 (mm)	Piste 2 (mm)	Piste 3 (mm)	Piste 4 (mm)	Piste 5 (mm)
	7,75	7,72	7,88	7,81	7,88
	7,78	7,70	7,81	7,79	7,82
	7,72	7,73	7,84	7,78	7,83
	7,76	7,74	7,85	7,80	7,84
	7,71	7,73	7,87	7,81	7,82
<b>Keskiarvo</b>	7,74	7,72	7,85	7,80	7,84
<b>Keskihajonta</b>	0,03	0,02	0,03	0,01	0,02

Taulukossa 49 ilmenee pienemmiksi osiksi leikatun referenssipaaluelementin seinämävahvuusmittausten tulokset. Taulukon perusteella näyttäisi siltä, että yksittäisen paaluelementin sisällä seinämäpaksuus vaihtelu on hieman pienempi kuin mitä tämä vaihtelu on mitattaessa paalujen keskinäistä vaihtelua, mutta pitää huomioida, että myös mitausotanta taulukossa 49 on pienempi kuin mitä edellä taulukoissa 46-48. Taulukon 49 perusteella voitaisiin olettaa, että paalun päädyistä tehdyt mittaukset olisivat melko hyvin yleistettävissä koskemaan koko paalua sen pituudelta.



Paalujen seinämävahvuudet ovat taulukossa 30 esitetyn SFS-EN 10219-2 -standardin vaihteluvälin sallimissa puitteissa riippumatta siitä, ovatko mittapisteet olleet standardin mukaisia vai ei. Paalut ovat kuitenkin seinämävahvuudeltaan selvästi valmistajan ilmoittamaa nimellisarvoa pienemmät, mikä on syytä huomioida maaperästä vuonna 2017 ja myöhemmin nostetuille paaluille tehtävissä mittauksissa. Näissä jatkotutkimuksissa on syytä verrata mitattua seinämävahvuustulosta tämän työn mittaustuloksiin.

Koska nämä seinämävahvuusmittaukset on tehty analogisella mikrometriruuvilla, täytyy näihin mittauksiin olettaa pieni mittajaasta ja mittavälineestä aiheutuva virhe. Virhe voidaan kuitenkin arvioida taulukoissa 46 ja 48 esitettyä keskihajontaa pienemmäksi.

### 7.3.2 Halkaisijamittaus

Osasta maahan asennettavista paaluista mitattiin niiden halkaisija otosluontoisesti. Tämän mittauksen tarkoituksena on varmentaa paalujen ulkoisia mittoja verrattuna ilmoitettuihin valmistusmittoihin ja muiden mittausten tavoin todentaa myöhemmin maasta nostettavissa paaluissa esiintyvä korroosio.

Halkaisijat mitattiin paalujen ulkopuolelta suuremmalla mikrometriruuvilla. Halkaisijamittauksia tehtiin viidestä maalattavasta paalusta, kun niiden pinnat olivat puhallettu maalausta varten puhtaaksi, ja viidestä maalaamattomasta paalusta toimitustilaisina. Mittauksia tehtiin metrin välein kuudesta mittapisteestä ja jokaisesta pisteestä mitattiin kaksi arvoa, yksi hitsisauman alueelta ja yksi saumaan nähden poikkisuuntaiselta alueelta. Kuvan 60 akselit Z ja Y vastaavat näitä mittauspisteitä. Halkaisijamittausten tulokset ovat esitettynä taulukoissa 50 ja 51.

**Taulukko 50.** Kuvan 60 Z-akselia vastaavat halkaisijamittaustulokset.

Paalun tunnistus	Paalun poikkipinnan halkaisija (mm)					
	Paalun pää	+1 metri	+2 metriä	+3 metriä	+4 metriä	+5 metriä
1	139,60	139,45	139,41	140,10	139,50	139,50
5	139,45	139,45	139,45	139,36	139,49	139,44
7	139,45	139,54	139,41	139,55	139,33	139,37
12	139,43	139,43	139,30	139,35	139,47	139,49
16	139,54	139,43	139,42	139,50	139,47	139,37
31	139,35	139,32	139,50	139,28	139,37	139,40
47	139,46	139,50	139,45	139,41	139,36	139,36
48	139,42	139,37	139,40	139,35	139,40	139,50
49	139,41	139,33	139,39	139,39	139,40	139,50
50	139,40	139,21	139,40	139,38	139,34	139,34
<b>Keskiarvo</b>	139,45	139,40	139,41	139,47	139,41	139,43
<b>Keskihajonta</b>	0,07	0,10	0,05	0,24	0,06	0,07

**Taulukko 51.** Kuvan 60 Y-akselia vastaavat halkaisijamittaustulokset.

Paalun tunnistus	Paalun poikkipinnan halkaisija (mm)					
	Paalun pää	+1 metri	+2 metriä	+3 metriä	+4 metriä	+5 metriä
1	139,59	139,89	139,40	139,50	139,36	139,45
5	139,25	139,36	139,34	139,40	139,37	139,38
7	139,35	139,35	139,33	139,42	139,29	139,31
12	139,37	139,49	139,44	139,43	139,45	139,39
16	139,32	139,39	139,48	139,43	139,44	139,42
31	139,21	139,30	139,25	139,35	139,35	139,33
47	139,30	139,40	139,26	139,45	139,40	139,41
48	139,28	139,40	139,28	139,33	139,33	139,20
49	139,27	139,38	139,43	139,43	139,41	139,28
50	139,35	139,50	139,40	139,33	139,40	139,39
<b>Keskiarvo</b>	139,33	139,45	139,36	139,41	139,38	139,36
<b>Keskihajonta</b>	0,10	0,17	0,08	0,06	0,05	0,08

Taulukoiden 50 ja 51 mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että putkipaalujen halkaisijoissa on vaihtelua suurimmillaan useita satoja mikrometrejä sekä paalujen välillä että paalujen sisällä. Näissä taulukoissa esitettyjä tuloksia tulkitessa on kuitenkin syytä muistaa, että tämä mittaus oli huomattavasti virheherkempi kuin esimerkiksi seinämävahvuusmittaus, sillä paalujen paksuin kohta haettiin silmämääräisesti. Tästä huolimatta taulukoissa 50 ja 51 esitetyt halkaisijatulokset ovat taulukossa 30 esitetyn SFS-EN 10219-2-standardin mukaan määritetyn vaihteluvälin mukaisia.

### 7.3.3 Metripainomittaus

Korroosion vaikutusta kappaleisiin tutkitaan usein niiden massahäviön kautta. Tästä syystä tätä tutkimusta varten mitattiin Tampereen teknilliselle yliopistolle jätetyistä kahdesta referenssipaalusta niiden metripainot. Metripainotulokset ovat esitettynä taulukossa 52. Taulukossa 52 sahattujen paalukappaleiden pituus on kolmen mittauksen keskiarvo, jotta mahdollinen vinoon sahautumisen aiheuttama virhe vähenisi.

**Taulukko 52.** Referenssipaalusta määritetty metripaino.

	Paalu 1			Paalu 26		
	Osa 1	Osa 2	Osa 3	Osa 1	Osa 2	Osa 3
<b>Pituus (cm)</b>	200,0	200,1	159,7	199,8	199,9	159,8
<b>Massa (kg)</b>	50,575	50,790	40,515	50,895	50,960	40,660
<b>Metripaino (kg/m)</b>	25,292	25,382	25,375	25,477	25,497	25,444

Taulukossa 52 esitettyjen metripainojen keskiarvoksi saadaan 25,411 kg/m. Valmistajan ilmoittama nimellisarvo näille putkipaaluille on 26 kg/m ja mitattu tulos on taulukossa 30

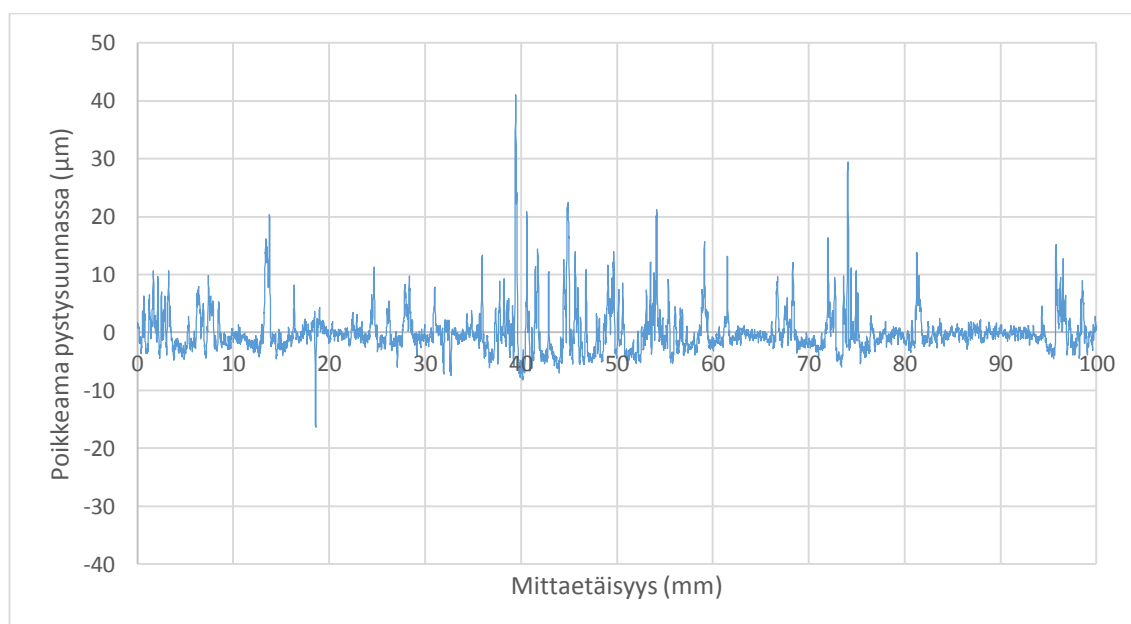
esitetyllä toleranssivälillä. Taulukon tuloksista myös näkee, että epoksimaalauksen vaikutus metripainoon on merkityksetön, sillä paalu 1 mitattiin maalattuna.

Vertailuna putkipaalon metripaino voidaan laskea käyttäen paalujen ulkoisia fyysisiä mittoja. Laskennallinen tiheys paaluputkessa käytetylle teräkselle on  $7,86 \text{ kg/m}^3$ . Valitsemalla taulukoissa 46, 48, 50 ja 51 esitetyistä keskiarvoista suurimmat pystytään laskemaan keskiarvallisesti näissä paaluputkissa suurin poikkipinta-ala ja siten suurin metripaino. Tällä tavalla laskien saatu metripaino on  $25,619 \text{ kg/m}$ . Tämä eroaa taulukon 52 arvojen keskiarvosta vain  $0,8 \%$ .

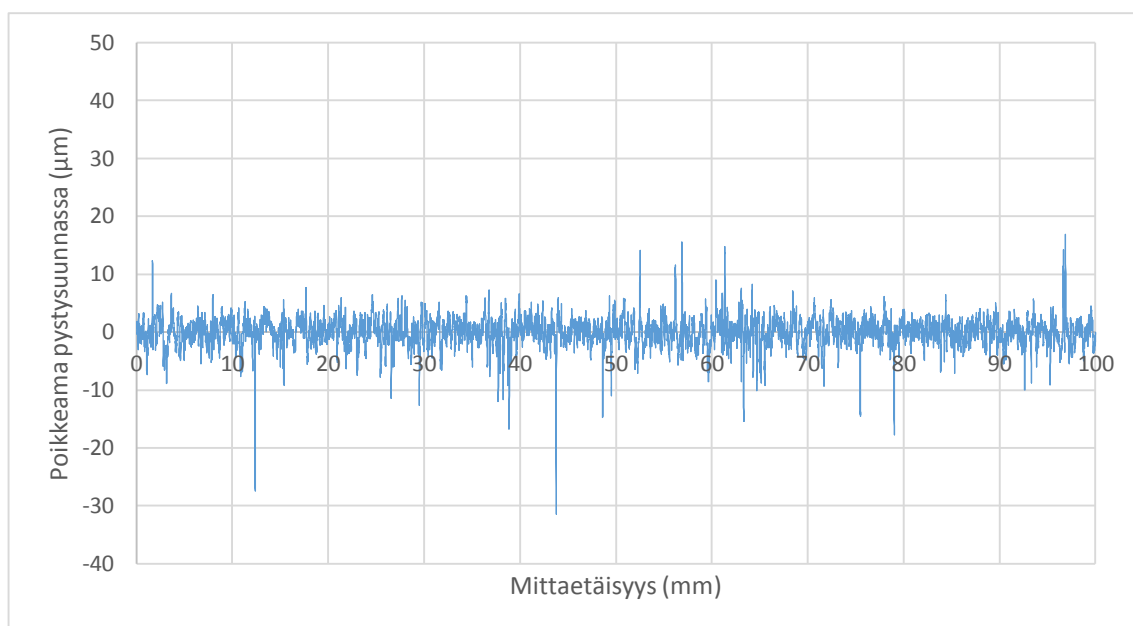
### 7.3.4 Pintojen optinen profilometria

Tampereen teknilliselle yliopistolle toimitetuista kahdesta referenssipaaluelementistä sahattiin vannesahalla 20 cm pitkät koepalat tarkasteltaviksi optisella Alicona InfiniteFocus G5 -3D-profilometrillä. Optisissa profilometrimittauksissa määritettiin pinnan topografista laatua pinnankarheussuureiden kautta.

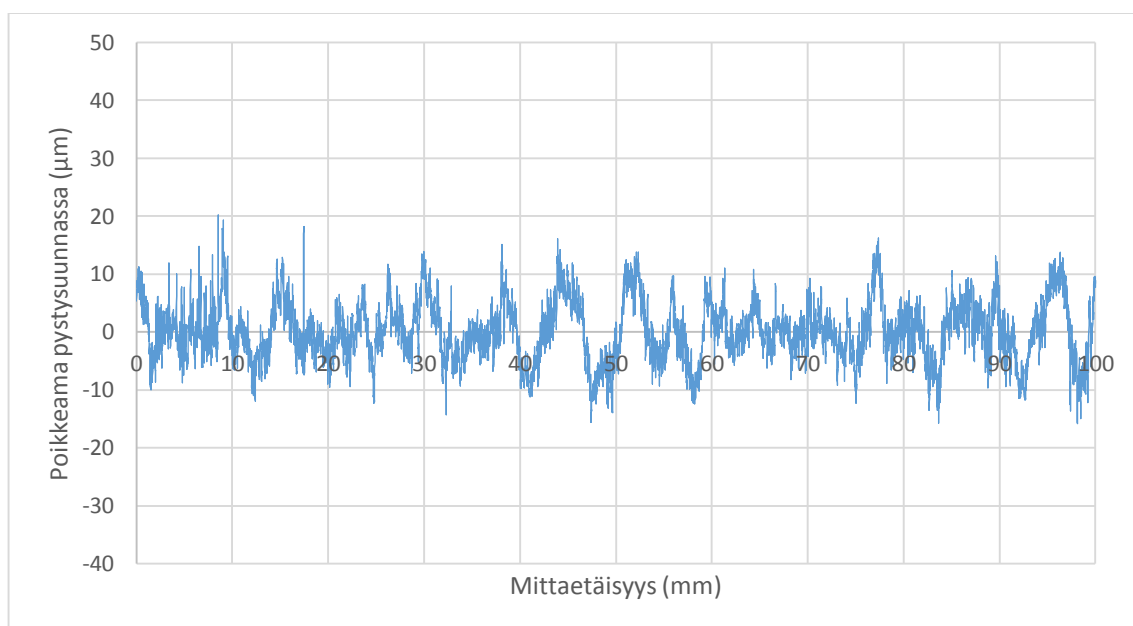
Pinnankarheusmittaukset tehtiin profilometrillä noin 15 cm matkalta. Kuvissa 63-66 pinnankarheuskäyrät on esitetty 10 cm mittausalueelta siten, että mittauksen alun ja lopun tulokset on karsittu pois, jotta mittalaitteen käyttöön liittyvät ulkoiset häiriötekijät eivät varmuudella näy tuloksissa.



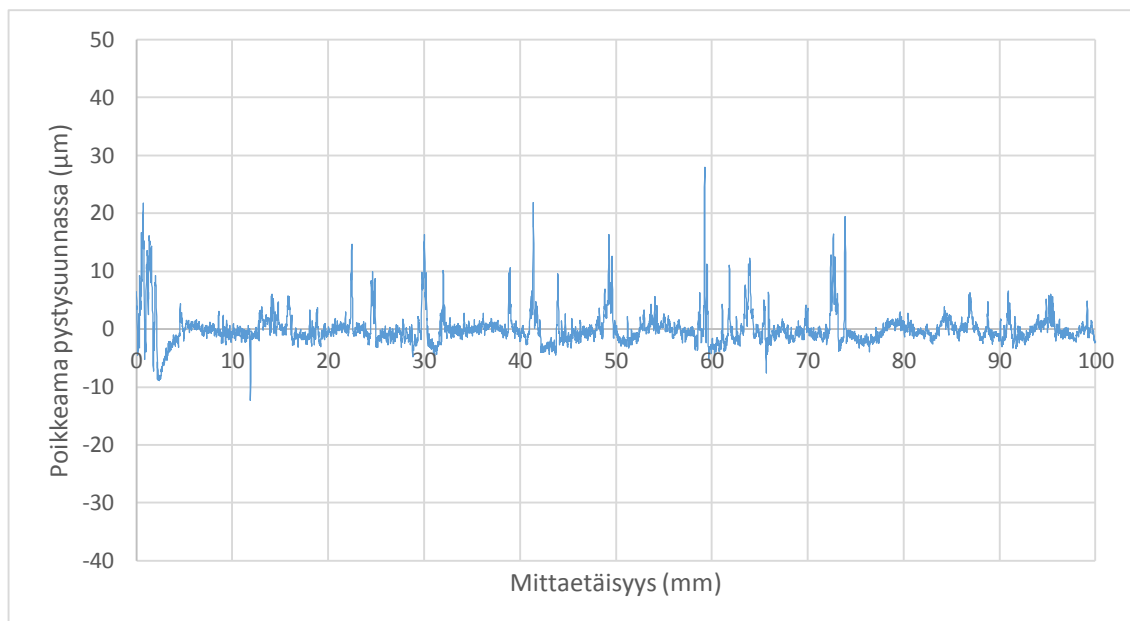
**Kuva 63.** Pinnankarheuskäyrä paalusta 26, kun paalu on ollut toimitustilaisena.



**Kuva 64.** Pinnankarheuskäyrä paalusta 26, kun paalun pinta on puhdistettu fosforihapolla.



**Kuva 65.** Pinnankarheuskäyrä pinnoitteesta paalussa 1.



**Kuva 66.** Pinnankarheuskäyrä hitsisauman kohdalta paalussa 1.

Kuvissa 63-66 esitettyjen pinnankarheusprofiilien keskiviiva kulkee 0 µm kohdalla. Jos kuvaajien käyrät olisivat suorat, jotka kuljisivat keskiviivaa pitkin, olisi pinta absoluuttisen tasainen ilman mitään poikkeamia. Taulukossa 53 on yhteenvetona keskeisimpiä mitaustuloksista määritettäviä suureita.

**Taulukko 53.** Optisella profilometrillä mitatut tulokset 10 cm mittausalueelta.

Suure	Paalu 1, hitsisauma	Paalu 1, pinnoite	Paalu 26, toimitustilainen	Paalu 26, puhdistettu
$R_a$ (µm)	1,7	4,1	2,4	1,8
$R_q$ (µm)	2,9	5,2	3,9	2,6
$R_z$ (µm)	40,3	36,0	57,3	48,3

Taulukossa 53 suure  $R_a$  tarkoittaa keskimääräistä pinnankarheutta mitatulla paalun pinta-alueella.  $R_q$  on pinnankarheuden neliöllinen keskiarvo ja  $R_z$  on suurimman huipun ja laakson välinen ero tällä mitatulla pinnalla. Nämä suureet on määritelty tarkemmin luvussa 6.2.

Taulukosta 53 on nähtävissä, että pinnoitettu paalupinta on pinnoittamatonta paalupintaa pinnankarheusarvoiltaan suurempi. Kuvasta 65 on kuitenkin huomattavissa, että maalattu pinta on pinnanvaihtelultaan tasaisempaa eikä sisällä selkeästi muuta pintaa korkeampia piikkejä toisin kuin maalaamaton pinta kuvassa 63. Maalipinnoite pienentää mitä ilmeisimmin huippujen ja laaksojen välistä korkeuseroa, koska maalia on kertynyt pinnan syvänteisiin.

Kuvassa 63 havaitaan useita noin  $20\text{ }\mu\text{m}$  korkuisia piikkejä, joista korkein on jopa  $40\text{ }\mu\text{m}$  korkea. Nämä pinnankarheuskäyrien piikit kertovat pinnanvaihtelusta sen, ettei valssausprosessissa synny mikrotasolla tasaista pintaa, vaan valssihilsettä on jossain kohdissa enemmän kuin muualla. Pinnan puhdistaminen fosforihapolla tekee pinnasta tasaisemman, mikä ilmenee vertaamalla kuvia 63 ja 64 sekä taulukon 53  $R_a$  ja  $R_q$  arvoja näissä kahdessa pinnassa. Kuvasta 64 voidaan kuitenkin havaita, että pinnan puhdistukseen käytetty happo on paikoitellen saattanut syövyttää pintaa puhdistusta enemmän, sillä kuvassa esiintyy syvempää kaksi laaksoa. Näissä poikkeamat keskiviivasta ovat noin  $-30\text{ }\mu\text{m}$  luokkaa.

Hitsisauman kohdalta tehdyissä mittauksissa on nähtävissä siihen kohdistuvan mekaanisen höyläyksen vaikutus siten, että siinä esiintyy selvästi vähemmän korkeita piikkejä kuin tavallisessa toimitustilaisessa pinnassa. Tämä on nähtävissä kuvista 63 ja 66, vaikka niissä tarkastellut paaluelementit ovatkin eri.

### 7.3.5 3D-laserskannaus

Referenssipaalusta 26 irrotettu 2 m osuus mitattiin Tampereen ammattikorkeakoulun konelaboratoriossa käsikäyttöisellä HandySCAN 700™ -lasermittauslaitteella, joka on esitettyinä kuvassa 67. Koemittauksella haluttiin arvioida laitteen soveltuvuutta Helsingin kaupungin pitkäaikaistutkimuksen jatkotutkimusvaiheisiin.

Laite muodostaa mittaustuloksen seitsemän laserin muodostamien ristikoiden avulla. Laitteella saavutettava maksimiresoluutio on  $0,050\text{ mm}$  ja maksimitarkkuus  $0,030\text{ mm}$  [123].



**Kuva 67.** HandySCAN 700™ -lasermittauslaite [123].

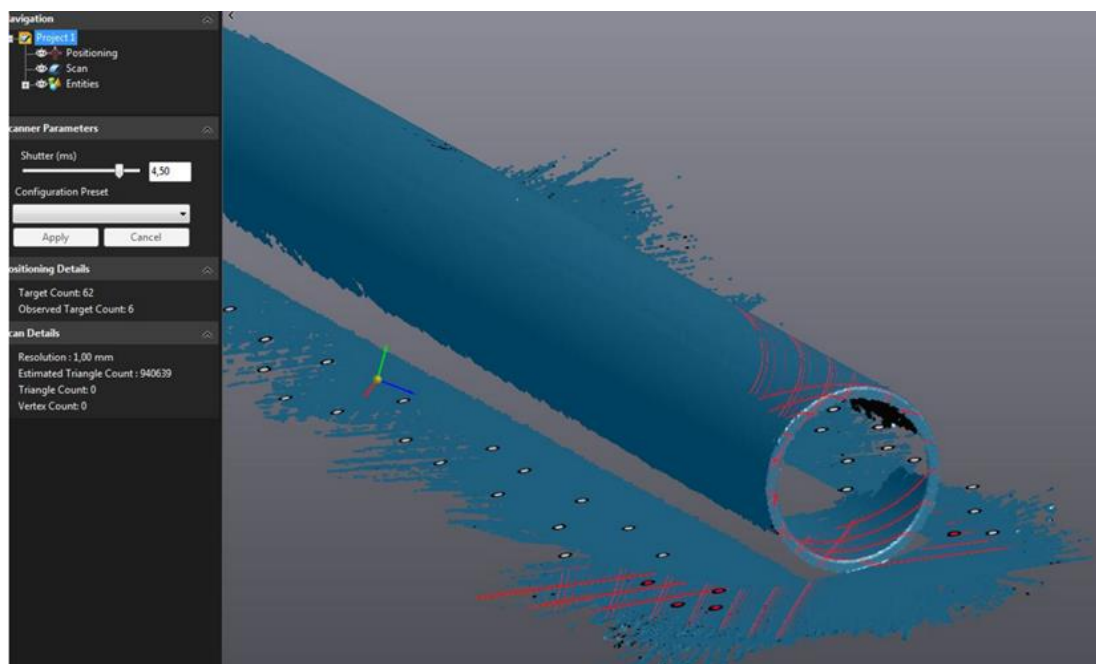
Mittausta varten laite käyttää paikoitukseen asemointimerkkejä, jotka on asetettava joko kappaleeseen tai kappaleen viereen. Niiden sijainti on täysin satunnainen. Asemointimerkit ovat pyöreitä ja ne näkyvät kuvassa 68.

Mittalaite on mitattaessa noin 30 cm etäisyydellä kappaleesta. 2 m pitkän putken skannaus kestää työn aloituksesta jälkikäsitteilyyn noin puoli tuntia. Skannauksen jälkeen täytyy vielä suorittaa jälkikäsitteilyä, jossa poistetaan esimerkiksi mahdollisia heijastuksia tai yksinäisiä saarekkeita, jotka eivät kuulu mitattavaan pintaan.

Kun tutkittava kappale on laitteella saatu mitattua, muodostuu siitä laitteeseen liittyvään tietokoneohjelmistoon kuvan 69 kaltainen malli. Kahta mittausta voidaan verrata toisiinsa tai mittaustulosta voi verrata laskennalliseen 3D-malliin, kuten kuvassa 70 on esitetty.

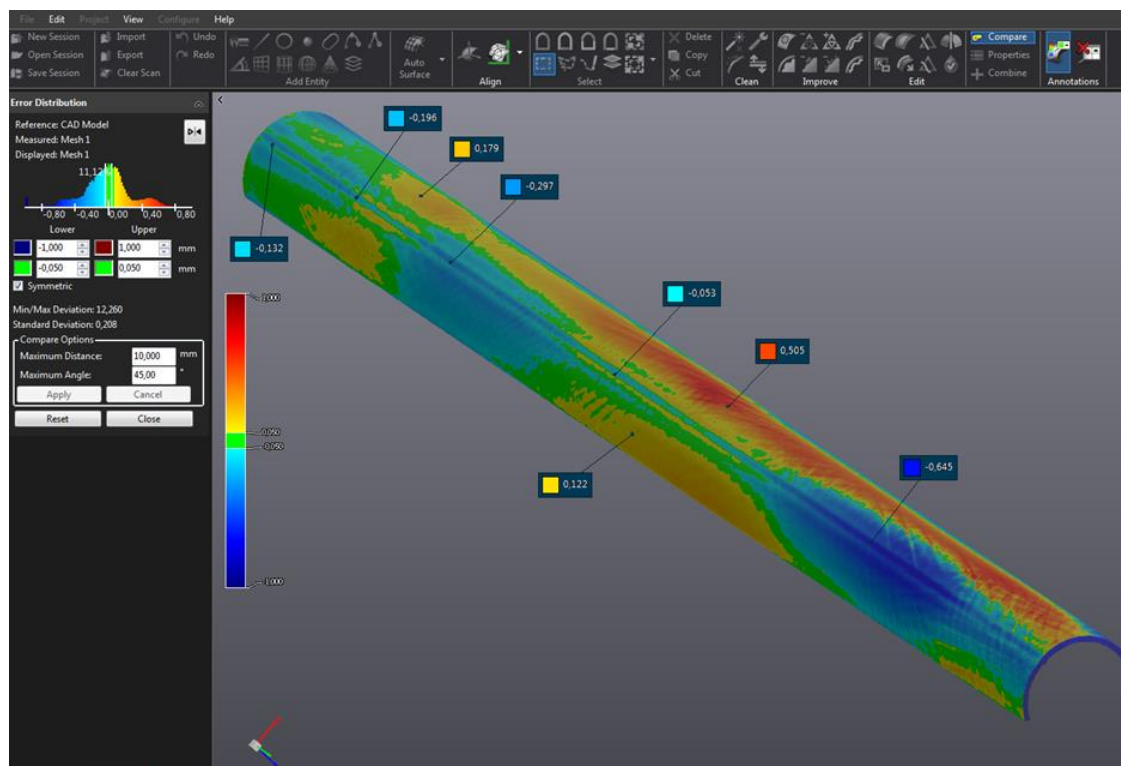


**Kuva 68.** Putkipaalun skannaaminen HandySCAN 700™ -lasermittauslaiteella.



**Kuva 69.** Putkipaalusta muodostunut kuva laitteen tietokoneohjelmistossa.

HandySCAN 700™-laitteen käyttöönotosta tehdään vuoden 2016 aikana Tampereen ammattikorkeakoululla opinnäytetyö, jossa laitteen käyttöä käsitellään tarkemmin. Tähän työhön liittyvissä jatkotutkimuksissa tällä laitteella voidaan mahdollisesti päästä havainnoimaan lasermittausten kautta korroosion ilmenemistä, jos korroosion aiheuttamat mitamuutokset ovat laitteen mittausalueen sisällä.



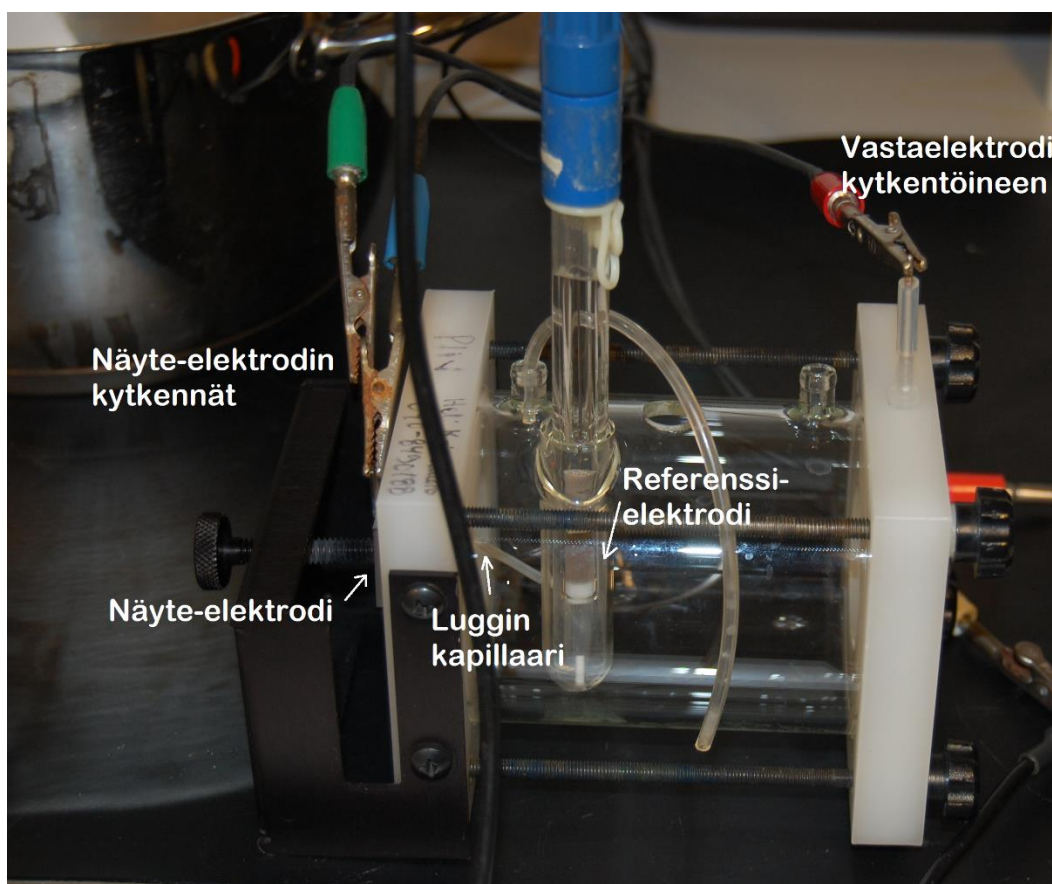
**Kuva 70.** Mitatun putkipaalun pinnan vertaaminen CAD-piirrettyyn putken 3D-malliin, jonka ulkohalkaisijana on 139,7 mm ja seinämävahvuutena on 8 mm.

### 7.3.6 Potentioistaattimittaukset

Putkipaalujen korroosioympäristössä esiintyvistä vedestä tehtiin potentioistaattimittaukset käyttäen tutkimuskappaleina referenssipäaluista irrotettuja 2 cm x 2 cm teräspaloja, joiden pintaa hiottiin hienolla P600-hiontapaperilla hapettumistuotteiden vaikutuksen vähentämiseksi. Tutkittavat materiaalit olivat paalutukseen käytetty S550J2H-rakenneteräs ja S440J2H-rakenneteräs.

Näissä mittauksissa määritettiin rakenneterästen polarisaatiokäyrät potentiodynaamisella menetelmällä. Käytetty potentioistaattilaitteisto, joka oli kytketty mittausdatan kirjaavaan tietokoneeseen, on esitettyä kuvassa 71.





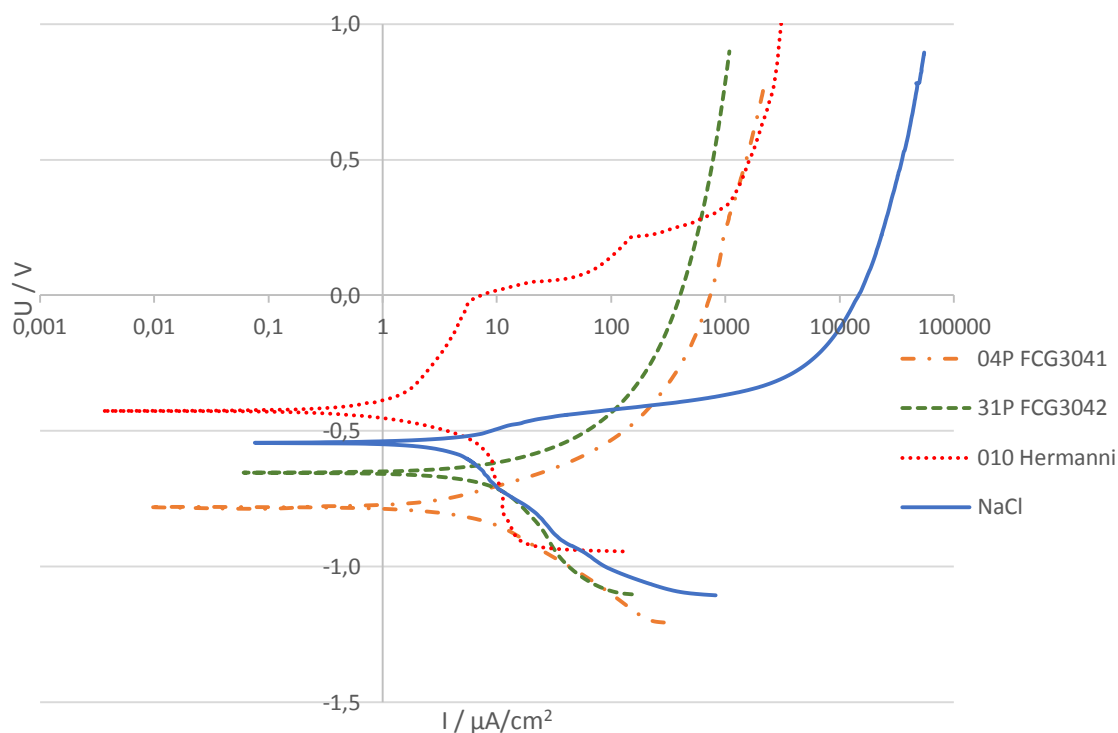
**Kuva 71.** Potentiostaattimittauksiin käytetty laitteisto.

Potentiostaattimittauksilla on tarkoitus selvittää, poikkeako S550J2H-teräksen korroosikäyttäytyminen selvästi S440J2H-teräksestä. Lisäksi voidaan arvioida putkipaalujen korroosioympäristössä esiintyvän orsivesien syövyttävyyttä suhteessa referenssiliuoksena olevaan 3,5 % NaCl-liuokseen. Mittausten tulokset ovat esitettynä kuvissa 72 ja 73.

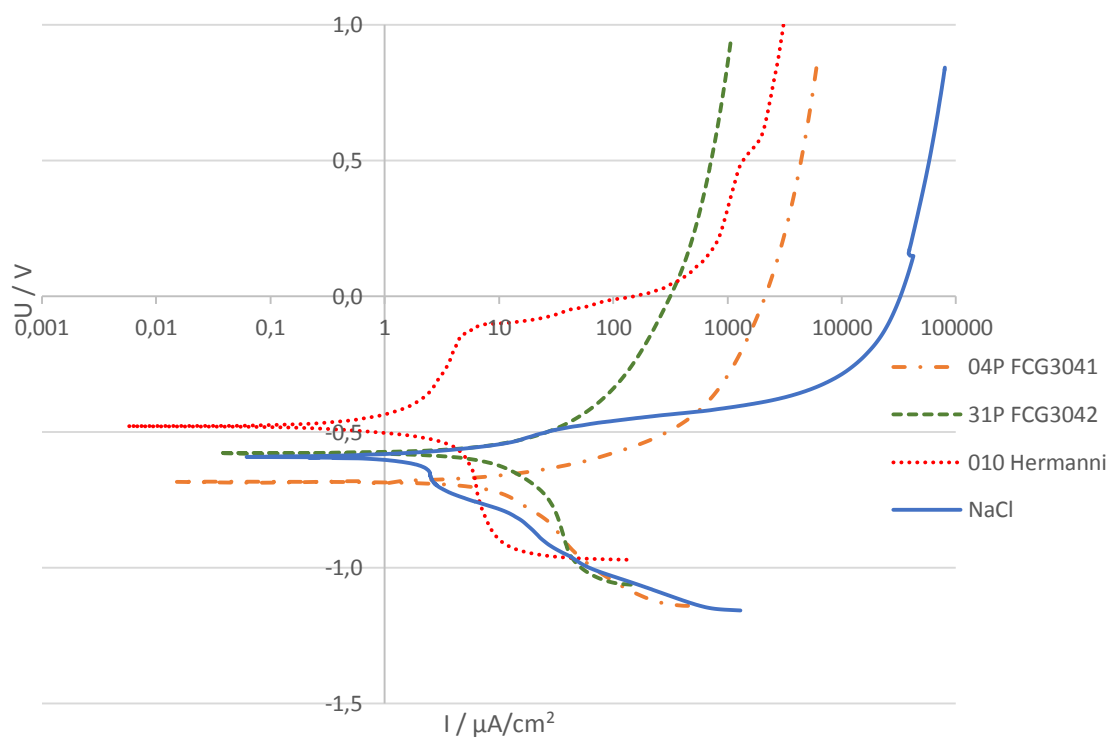
Teräsnäytteiden lisäksi Temaline NL -epoksinnoitteelle määritettiin polarisaatiokäyrä. Tähän käytettiin maalatusta S550J2H-rakenneteräspuutkesta irrotettu näytettä. Tällä mittauksella haluttiin karakterisoida suojaavan pinnoitteen merkitystä korroosion kannalta. Pinnoitteen polarisaatiokäyrä määritettiin vain 3,5 % NaCl-referenssiliuoksessa. Mittauksen tulokset ovat esitettynä kuvassa 74.

Valmiita vesinäytepisteitä oli kaksi: 35 m päässä 60-luvun täytön paalutuksesta, 33 m päässä 70-luvun täytön paalutuksesta. 50-luvun täytön paalutuksen yhteyteen asennettiin uusi näytepiste. Näiden sijainti on esitettynä kuvassa 37.

Kuvissa 72 ja 73 50-luvun täytön pisteeseen viitataan tunnuksella 010 Hermanni, 60-luvun täytön pisteeseen tunnuksella 31P FCG3042 ja 70-luvun täytön pisteeseen tunnuksella 04P FCG3041. 50-luvun täytön vesinäyte on otettu 6 m maanpinnan alta, 60-luvun täytön 4 m maanpinnan alta ja 70-luvun täytön 3 m maanpinnan alta. Näytteiden otosyvyys on vaikuttanut putken asennussyvyys.



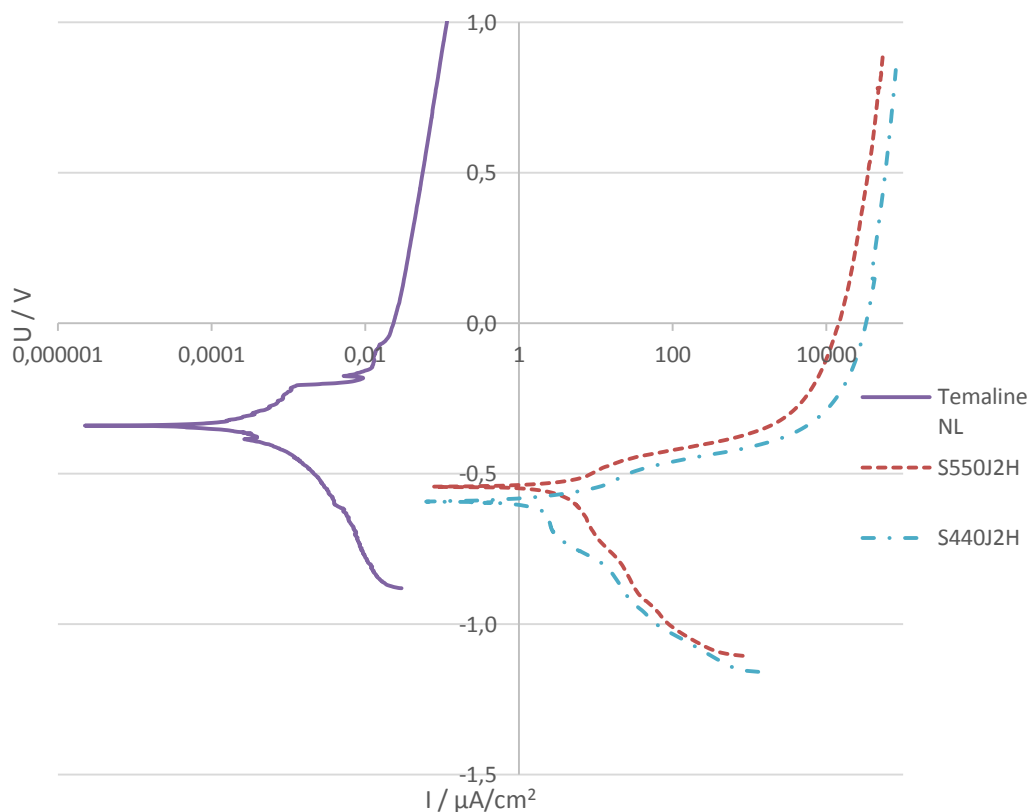
**Kuva 72.** Potentiostaattimittausten tulokset S550J2H-rakenneteräkselle.



**Kuva 73.** Potentiostaattimittausten tulokset S440J2H-rakenneteräkselle.

Kuvissa 72 ja 73 50-luvun vesinäytteellä mitattujen tulosten muoto poikkeaa selvästi muista mittauskäyristä. Tämä voi johtua esimerkiksi siitä, että näytteenottopiste on uusi. Tällöin otettu vesinäyte ei eri ainepitoisuuksiltaan tai muilta ominaisuuksiltaan täysin

edusta pitkällä aikavälillä tasoittunutta vesinäytettä, sillä veteen on voinut liueta putken asennuksessa jotain.



**Kuva 74.** Eri materiaalien potentiostaattimittaukset 3,5 % NaCl-liuoksessa.

Tietokoneanalyysillä potentiostaattimittauksista määritettiin polarisaatiokäyrien Tafel-kertoimet  $\beta_a$  ja  $\beta_c$ , korroosiopotentiaali  $E_{corr}$  ja korroosionopeus  $i_{corr}$ . Nämä suureet on määritetty luvussa 6.3.2 ja niiden mittauks tulokset on esitetty taulukoissa 54 ja 55.

**Taulukko 54.** Potentiostaattimittausten suureiden tulokset S550J2H-teräkselle.

	3,5% NaCl	04P FCG3041	31P FCG3042	010 Her- manni
Korroosionopeus $i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	2,69	0,46	6,11	12,86
Korroosiopotentiaali $E_{corr}$ (V)	-0,540	-0,780	-0,654	-0,427
Anodinen Tafel-kerroin $\beta_a$	0,0913	0,0709	0,1396	0,8789
Katodinen Tafel-kerroin $\beta_c$	0,3677	0,0517	0,2897	0,1650

**Taulukko 55.** *Potentiostaattimittausten suureiden tulokset S440J2H-teräkselle.*

	3,5% NaCl	04P FCG3041	31P FCG3042	010 Her- manni
Korroosionopeus $i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	1,70	1,35	0,94	0,38
Korroosiopotentiaali $E_{corr}$ (V)	-0,590	-0,680	-0,577	-0,479
Anodinen Tafel-kerroin $\beta_a$	0,0816	0,0592	0,0524	0,1590
Katodinen Tafel-kerroin $\beta_c$	0,6481	0,1147	0,0634	0,0702

Korroosiopotentiaalien ja -nopeusten arvot ovat kaikissa liuksissa molemmilla teräsnäyttemateriaaleilla samaa suuruusluokkaa, mikä ilmenee myös polarisaatiokäyrien samantaisista muodoista. Suurin todennäköinen syy korroosionopeuksien poikkeamiselle toisistaan on ekstrapolaatiokäyrien sijaintien valikoituminen. Niiden sijainti riippuu käyrien muodosta.

## 7.4 Putkipaalujen maalaus

Maaperäkorroosiotutkimusta varten maaperään upotetuista paaluista 25 maalattiin toiselta puoleltaan kaksikomponenttisellä epoksinnoitteella. Maalattava alue rajattiin teipillä. Epoksinnoitteen avulla haluttiin tutkia, onko tällaisella maalatulla pinnoitteella merkitystä maaperäkorroosion kannalta.

Putkipaalut maalasi hämeenlinnalainen Hämeen Teollisuuspinnoitus Oy. Putkipaaluelementit maalattiin suuresta 6 m pituudestaan johtuen käsin. Jotta maalin tarttuminen putkipaalujen pintaan olisi parempi, suihkupuhallettiin paaluelementtien maalattava pinta teräskuulilla maalijärjestelmän vaatimaan Sa 2½ -vaatimusluokkaan ennen maalausta. Maalaustyö näkyy kuvassa 75 ja maalaamiseen käytetty ruisku on esitettyä kuvassa 76.



**Kuva 75.** *Putkipaalujen maalaaminen.*



*Kuva 76. Maalaamiseen käytetty ruisku.*

#### 7.4.1 Maalipinnoite

Putkipaaluihin käytetty maalipinnoite on Tikkurilan Temaline NL-epoksiyhdistelmä. Se on kaksikomponenttinen, niukkaliukoinen epoksinpinnoite koostuen maalista ja koveteesta [124]. Niukkaliukoisuudella tarkoitetaan sitä, ettei maalia voida ohentaa vedellä tai liuottimilla.

Temaline NL soveltuu SFS-EN ISO 12944-2 mukaisiin rasitusluokkien C5-I-H, C5-M-H, Im1, Im2 ja Im3 kohteisiin. C5-I-H ja C5-M-H ovat hyvin ankaran teollisen ilmaston ja hyvin ankaran meri-ilmaston aiheuttaman ilmastokorroosion rasitusluokkia. Ilmastorasitusluokat on esitelty luvussa 2. Vastaavasti Im1, Im2 ja Im3 ovat makeaan veteen, meri- tai murtoveteen ja maaperään upotettujen rakenteiden luokituksia [13].

Edellä kuvailtujen rasitusluokkien käyttökohteita ovat esimerkiksi merimerkit, laiturirakenteet, patoluukut ja hiili-, hake- ja turvesiilojen sisäpinnat. Temaline NL-pinnoitteen esitetään sopivan tällaisiin voimakkaisiin mekaanisten ja kemiallisten upotusrasitusten alaisiin teräspintoihin [124; 125]. Nämä luokitukset toteutuvat työssä, sillä paalut upotetaan maaperään lähellä merta rannikkokaupungissa ja alueella, jossa on eriasteista teollisuutta.

Tätä epoksimaalia käytetään maalausjärjestelmässä EP500/2-FeSa2½. Tällöin kuivakalvon 500 µm nimellispaksuus saavutetaan maalaamalla kaksi 250 µm kerrosta. Maalipinta varten odotetaan teräspintojen suihkupuhdistusta SFS-EN ISO 8501 -standardin mu-



kaiseen esikäsitelyasteeseen Sa 2½. Työssä tämä saavutettiin kuulapuhaltamalla maalatavien paalujen pinta kuvassa 62 näkyvän mukaisiksi. Tälle epoksinnoitteelle ei käytetä erillistä pohjamaalia.

## 7.4.2 Maalipinnoitteen paksuusmittaus

Maalausjärjestelmä määrittä Temaline NL-epoksinnoitteelle 500 µm nimellispaksuuden. Standardien SFS 5873 ja SFS-ISO 19840 mukaan kaikkien yksittäisten kuivakalvonpaksuuksien tulee olla vähintään 80 % kuivakalvon nimellispaksuudesta, jotta maalaustulos on pinnoitteelle asetettujen kestävyyssehtojen mukainen [95; 126]. Näiden putkipaalujen tapauksessa vaadittu maalipinnan minimipaksuus on siis 400 µm.

Maalatuista putkipaaluista mitattiin kuvassa 77 esitetyllä Elcometer 300 -pinnoitteenpaksuusmittarilla maalipinnan paksuus 11 satunnaisesti valitusta paaluelementistä, jotta voitiin selvittää, täytyvätkö edellä kuvaillut ehdot. Samalla pystyttiin todentamaan pinnoitteen laatu paksuusvaihteluina.



**Kuva 77.** Maalipinnoitteen paksuuden mittaamiseen käytetty laitteisto.

Pinnoitteenpaksuusmittarilla tehtyjen mittausten tulokset ovat esitettynä taulukossa 56. Maalin paksuuksia mitattiin metrin välein yhteensä kuudesta mittauspisteestä ja jokaisesta mittauspisteestä kolmesta kohdasta: keskeltä maalipinnoitetta sekä pinnoitetun alueen reunoilta molemmilta puolilta. Ensimmäinen mittauspiste on metrin päässä jatkoksen päästä ja viimeinen mittauspiste noin 5 cm paalun jatkoksettomasta päästä. Tästä johtuen mittauspisteet eivät täysin vastaa taulukoiden 50 ja 51 mittauspisteitä.

**Taulukko 56.** *Maalipinnoitteen paksuus paaluelementeissä.*

Paalun tunnus	Oikea reuna jatkoksesta katsottuna		Maalipinnoitteen keskeltä		Vasen reuna jatkoksesta katsottuna	
	Keskiarvo (µm)	Keskihajonta (µm)	Keskiarvo (µm)	Keskihajonta (µm)	Keskiarvo (µm)	Keskihajonta (µm)
1	371	75	561	106	367	232
2	487	232	545	98	513	145
3	493	95	508	57	477	145
4	454	70	510	70	514	117
9	526	90	527	83	308	104
10	460	84	589	55	492	82
17	460	40	648	45	710	104
18	510	83	733	70	677	108
19	583	110	659	60	620	84
20	503	112	658	111	491	66
25	573	150	670	109	633	73

Taulukosta 56 nähdään, että vaadittu kalvon paksuus toteutuu maalipinnoitteen keskellä. Tarkempien mittaustulosten mukaan ainoastaan yhdessä mittapisteessä maalipinnoitteen keskellä tulos alittaa 400 µm. Sen sijaan maalatun alueen molemmilla reunoilla maalipinnan paksuus vaihtelee hyvinkin paljon riippuen paaluelementistä. Taulukosta 56 nähdään, ettei 400 µm ehto toteudu ainakaan paaluelementtien 1, 2 ja 9 reunoilla.

Ohuin yksittäinen mitattu maalin paksuus oli 208 µm paaluelementissä 1. Vastaavasti paksuin yksittäinen mittaustulos oli 885 µm paaluelementissä 18. Vaihteluväli pinnoitteen paksuudessa oli saman paaluelementin eri mittauksissa suurimmillaan 627 µm. Tämä vaihtelu havaittiin elementissä 1. Mittaustulokset osoittavat selkeästi, kuinka laadultaan epätasaista maalipintaa käsityönä tehtävä ruiskutus tuottaa.

Mittausvälineen antaman lukeman oikeellisuutta arvioitiin vertaamalla sitä mikrometrillä tehtyihin mittauksiin paaluista. Satunnaisten maalattujen paalujen paksuus mitattiin kuvan 60 mukaisesta tunnetusta maalatusta kohdasta mikrometrillä ja samasta kohdasta luettiin pinnoitteenpaksuusmittarin lukema. Kun maalatun paalun mikrometrituloksesta vähennettiin vastaava maalaamattoman paalun tulos, saatiin mikrometrillä mitattu maalin paksuus.

Pinnoitteenpaksuusmittarilla mitattiin keskimäärin 28 µm suurempia tuloksia kuin mikrometrillä. Tulosten keskihajonta oli 14 µm. Pinnoitteenpaksuusmittarilla mitattuja tuloksia voidaan siis pitää riittävän luotettavina, kun huomioidaan yleisesti suuri vaihteluväli käsin maalatun pinnoitteen vahvuudessa.

## 7.5 Paalutustyö

S550J2H-teräksiset 140/8-putkipaalut lyötiin tutkittavaan maaperään lokakuun alussa 2015. Paalutustyön teki Auranmaan Teräspaaluttajat Oy. Paalujen upotukseen käytetty paalutuskone on esitettynä kuvassa 78.

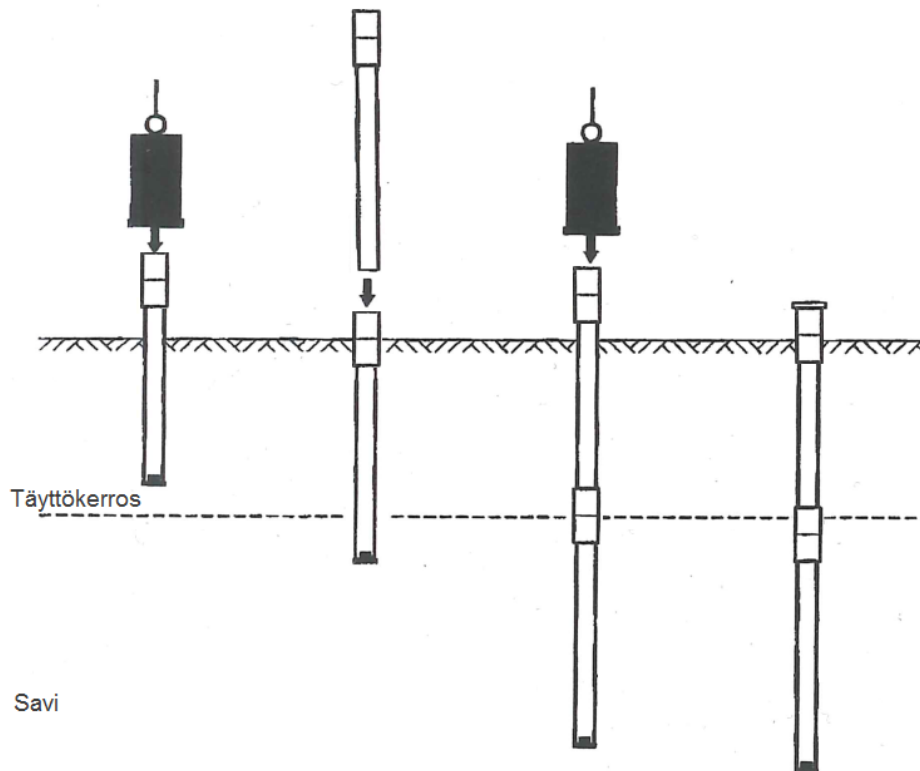


**Kuva 78.** *Kyläsaaren koepaalujen asennukseen käytetty paalutuskone.*

Koska osa teräspaaluista oli korroosiotutkimuksen johdosta maalattu epoksimaalilla, oli tarpeen, että paalut upotettaisiin lyömällä ylhäältä päin eikä varteen tarraavalla lyöntilaitteella. Tällaisen paalutustyön työvaiheet on havainnollistettu kuvassa 79. Tässä kuvassa on esitettynä myös suurpiirteisesti eri maakerrosten sijainti putkipaalujen upotukseen nähden perustuen aistihavaintoihin siihen, kuinka kevyenoloisesti paalut upposivat asennettaessa maaperään. Luvussa 7.1.3 esitetyn taulukon 41 ja kuvien 41-44 leikkauspiirrosten perusteella täyttökerros on kuitenkin ohuempi, kuin mitä kuvassa 79 on esitetty.

Upotettujen paalujen ympärille asennettiin betoniset kaivorenkaat ja valurautaiset kaivonkannet. Asennettava kaivorengas kansineen on esitettynä kuvassa 80. Rengas tai kansi ei ole suorassa kontaktissa asennetun paalun kanssa, vaan näiden väliin jätettiin tilaa eikä kaivonrengasta täytetty esimerkiksi ylimääräisellä maa-aineksella.





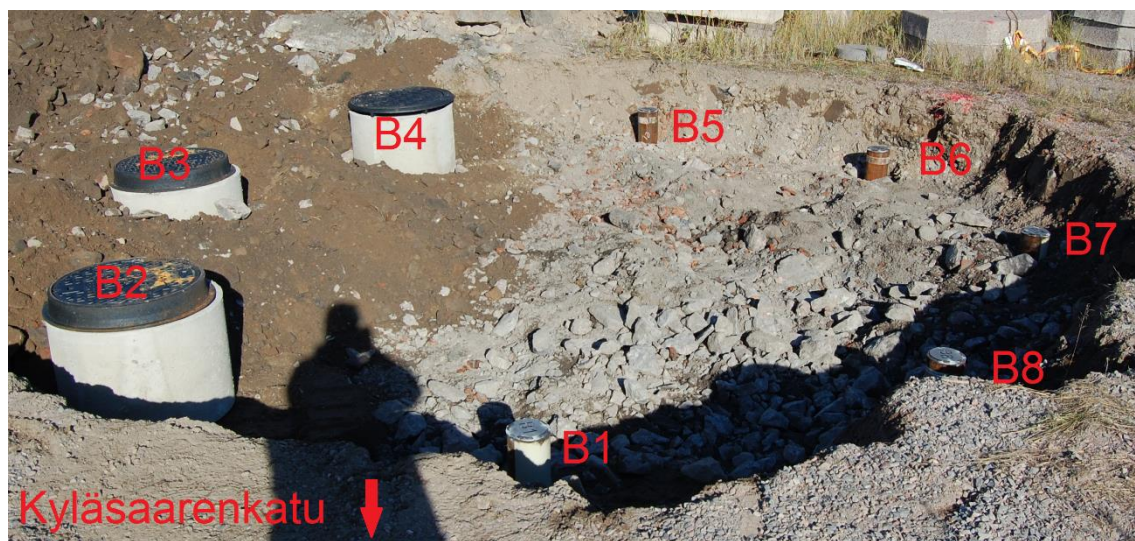
**Kuva 79.** Lyötävän pienpaalun työvaiheet, muokattu lähteestä [46].



**Kuva 80.** Maahan lyödyn paalun ympärille asennettu kaivorengas kansineen.

Paalut upotettiin kaikissa kolmessa tutkimuspisteessä maaperään siten, että ne muodostivat ympyräkehän. Paalujen kesken välimatka kehällä on noin 2 metriä, jotta ne vaikuttaisivat korroosiokokeen aikana toisiinsa mahdollisimman vähän. Toisaalta, jos ne vaikuttavat, vaikuttavat ne tasaisesti kaikkien yksittäisen kohteen paalujen kesken.

Jokaisessa tutkimuspisteessä lähimmäksi Kyläsaarenkatua upotettu paalu aloittaa juoksevan numeroinnin luvulla 1. Tästä paalujen merkintänumerointi kiertää kehällä myötäpäivään. Kuvassa 81 on esitettyä merkintöjen kierto 60-luvun täyttöä edustavan tutkimuspisteen paalukehässä.



**Kuva 81.** Paalujen merkintöjen kierto yhdessä tutkimuspisteistä.

Paalukehissä puoliksi epoksimaalatut ja täysin maalaamattomat paalut vuorottelevat. Paaluissa maalattu pinta aukeaa satunnaiseen suuntaan. Taulukossa 57 on listattuna kuhunkin kohteeseen asennetut paalut elementteineen ja merkintöineen.

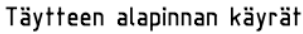
**Taulukko 57.** *Asennettujen paalujen sijoittuminen tutkimuspisteisiin.*

Täytön ajankohta	Hitsattu tunnus	Ylemmän paa-luelementti numero	Alemman paa-luelementti numero	Maalattu/maalaamaton
50-luku	A1	48	50	maalaamaton
	A2	13	10	maalattu
	A3	47	45	maalaamaton
	A4	15	14	maalattu
	A5	41	42	maalaamaton
	A6	16	17	maalattu
	A7	31	32	maalaamaton
	A8	12	11	maalattu
60-luku	B1	24	25	maalattu
	B2	46	43	maalaamaton
	B3	22	23	maalattu
	B4	30	49	maalaamaton
	B5	21	19	maalattu
	B6	28	29	maalaamaton
	B7	20	18	maalattu
	B8	27	44	maalaamaton
70-luku	C1	7	8	maalattu
	C2	40	39	maalaamaton
	C3	9	6	maalattu
	C4	38	33	maalaamaton
	C5	3	4	maalattu
	C6	36	37	maalaamaton
	C7	5	2	maalattu
	C8	34	35	maalaamaton

Teräspaalujen lisäksi Kyläsaaren korroosiotutkimusalueelle asennettiin juntaamalla kuusi 6 m teräsbetonipaalua. Jokaiseen tutkimuspisteeseen asennettiin kaksi paalua ja paalut merkittiin upotuksen jälkeen hitsaamalla kirjaimet TB ja juokseva numerointi 1-6.

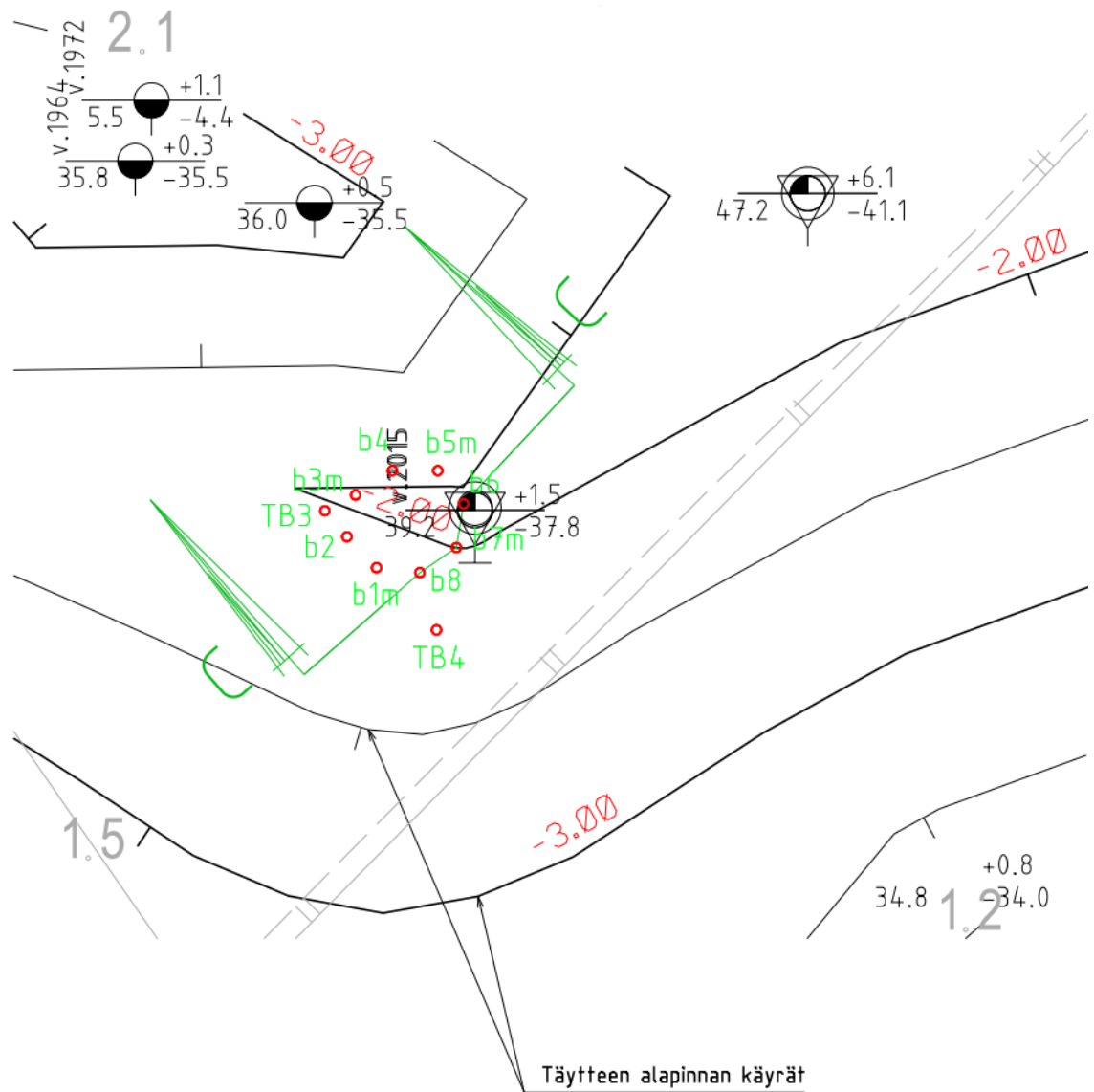
Nämä teräsbetonipaalut eivät kuulu tämän diplomityön sisältöön. Tampereen teknillisen yliopiston Materiaaliopin laitoksella kirjoitetussa raportissa kuvaillaan tarkemmin niitä, niiden paalutusta ja niiden käsittelyä [127]. Raportti on tämän työn liitteenä 5. Teräsbetonipaaluista, kuten tämän diplomityön teräspalkkipaaluista, säilytetään referenssikappalet jatkotutkimuksia varten Tampereen teknillisen yliopiston tiloissa.

Teräsbetonipaalujen sijainnit suhteessa teräspaaluihin on esitetty kuvien 82-84 kartoissa. Kuvissa 82-84 esitetyt leikkaukset A-D on esitetty aiemmin kuvissa 41-44. Kuvista ilmenee myös esimerkiksi eri tutkimuspaikkojen täyttöjen alueelliset paksuudet.

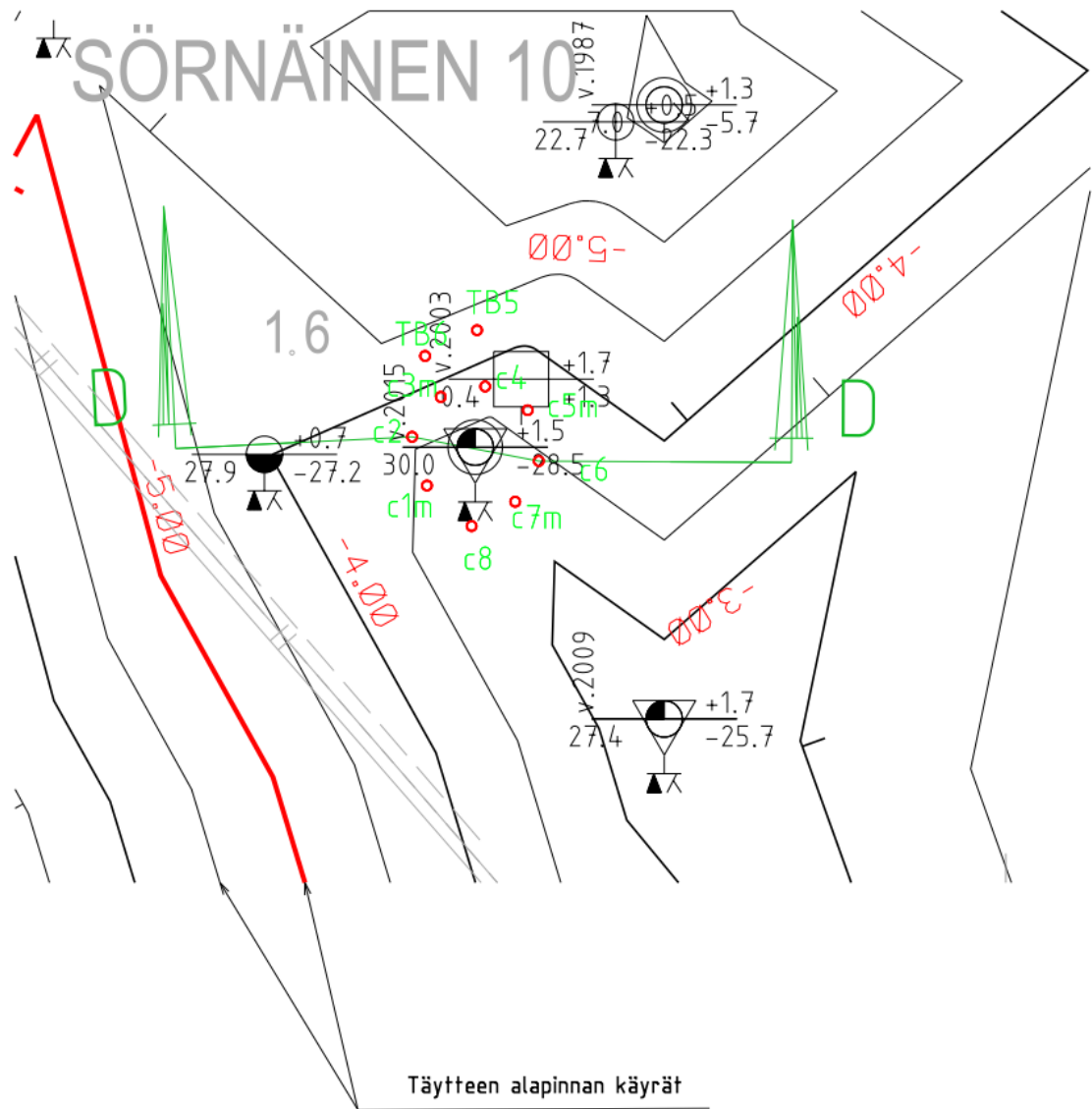


**Kuva 82.** 50-luvulla täytetyille alueelle asennettujen koepaalujen keskinäiset sijainnit, alueen täytteen paksuuden vaihtelu ja kuvien 41 ja 42 leikkausten sijainnit.





**Kuva 83.** 60-luvulla täytetylle alueelle asennettujen koepaalujen keskinäiset sijainnit, alueen täytteen paksuuden vaihtelu ja kuvan 43 leikkauksen sijainti.



**Kuva 84.** 70-luvulla täytetylle alueelle asennettujen koepaalujen keskinäiset sijainnit, alueen täytteen paksuuden vaihtelu ja kuvan 44 leikkauksen sijainti.

## 8. MITTAUSTULOSTEN JA MUIDEN HAVAINTOJEN ANALYSOINTI

Kokeellisen osuuden tuloksia käsitellään tässä luvussa. Tuloksista keskitytään maanäyte-analyyseissa saatuihin mittaustuloksiin ja potentiostaattimittauksissa saatuihin tuloksiin, sillä tässä pitkäaikaistutkimuksen aloitusvaiheessa vain näitä pystytään analysoimaan laajemmin.

Luvussa 7 esitetyt paalutusta edeltävät mittaukset, kuten seinämävahvuusmittaukset, ovat jatkotutkimuksia varten tarvittavaa mittaustuloksia eikä niitä itsessään pystytä vielä tässä työssä analysoimaan, vaan niitä on tarkoitus verrata jatkotutkimuksissa ilmenevään seinämävahvuuden ohenemiseen. Tähän lukuun on kuitenkin koostettu alustavaa arviota syöpymälle, jonka toteutumista voidaan jatkotutkimuksissa verrata todelliseen syöpymään.

### 8.1 Maaperänäytteiden analyysit

Paalutuspisteistä tehtyjen geoteknisten maalajimääritysten tulokset taulukossa 41 ja kuvissa 41-44 vastaavat aikaisemmissa pilaantumisselvityksissä tehtyjä. Selvästi tuhkatäytöksi epäiltyä maa-ainesta havainnoitiin 2-4,5 metrin syvyydellä maanpinnasta, joka sopisi aikaisemman selvityksen perusteella tehtyyn oletukseen, että tuhkatäyttöä olisi enintään 6 metrin syvyydessä. Kuvien 82-84 mukaan täyttökerroksen paksuus vaihtelee 2-5 m välillä tutkittavasta paalutuspisteestä riippuen.

Geoteknisen määrittelyn huomautukset mustasta maaperänäytteissä kuitenkin lisäävät mahdollisuutta, että tuhkaa voisi esiintyä kuitenkin jopa 7 m syvyyteen asti, sillä polttolaitostuhka voi olla väriltään mustaa tai tumman ruskeaa. Toisaalta rikkiyhdisteitä sisältävää maa-ainesta kuvaillaan myös yleensä mustaksi ja aikaisemman tiedon perusteella tällaista savea on myös pääkaupunkiseudun merenpohja-alueilla tai entisillä merenpohja-alueilla, joten värin johtumista tästä ei voida myöskään kumota. Luonnollista olisi myös näiden kahden maa-aineksen, merenpohjan ja siihen tehdyn täytön, sekoittuminen.

Tätä diplomityötä varten otetuissa maanäytteissä sulfaattipitoisuus (taulukot 42-44) jää kuitenkin selvästi pienemmäksi kuin mitä Helsingin kaupungin Vahanen-yhtiöillä teettämän pilaantumisselvityksen [119] tai Leppäsen 90-luvulla tekemän tutkimuksen [53] suurimmat pitoisuudet. Sulfaattipitoisuudet ovat kuitenkin yleisesti samaa suurusluokkaa Leppäsen havaintojen kanssa. Yhdessä näytteistä esitettyjen rikkipitoisuuksien kanssa voidaan pitää mahdollisena, että sulfaatteja pelkistäviä bakteereja esiintyy läjityksen alla olevassa savikerroksessa, jos pH- ja happiolosuhteet ovat paikallisesti oikeat.

Maanäytteiden pH on tuloksissa (taulukot 42-44) vaihdellut yleisesti mittaussyvyydestä ja -paikasta riippuen arvojen 7,3-8,9 välillä, mikä vastaisi tuloksiltaan aikaisempaa pilaantumisselvitystä. Kuitenkin sekä 50-luvun että 70-luvun paalutuspisteissä on 2-3,5 m syvyydessä selkeästi emäksisempi alue. Laboratorioanalyysissä näistä näytteistä löytyivät korkeat karbonaatti- ja kalsiumpitoisuudet, jotka selittänevät emäksisyyden. Maalaji-analyysissä näistä näytteistä löydettiin tuhkaksi oletettua ainesta, jota laboratorioanalyysin tulos tukisi, sillä nämä ovat tyypillisiä aineita tuhkassa.

Maanäytteille laboratorioanalyysissä määritetty sähkönjohtavuus vastasi sekä aikaisemmin tehdyn pilaantumisselvityksen tuloksia että Leppäsen korroosiotutkimusta. Sähkönjohtavuus vaihteli kaikissa paalutuspisteissä näytteenottosyvyyden mukaan, mutta sen kytkeminen maalajiin on kuvien 45-47 nojalla vaikeaa.

Kuvien 45-47 mukaisesti kaikissa paalutuspisteissä jo 2-3,5 m syvyydessä sähkönjohtavuus oli lähes 100 mS/m tai yli. Tämä on ominaisvastuksena ilmaistuna 10  $\Omega$ m tai alle ja tätä pidetään vakavan korroosioriskin rajana. Vaarallisen korkeaa sähkönjohtavuutta havaittiin myös syvemmältä otetuissa näytteissä. Sähkönjohtavuuden ja ionien, kuten kloridin, pitoisuuden välillä oleva riippuvuus on kuitenkin selvästi nähtävissä maanäytteiden analyysituloksista kuvissa 45-47.

50- ja 60-luvun paalutuspisteiden maanäytteistä on havaittavissa korkeita kupari-, lyijy- ja sinkkipitoisuuksia yli 1,5 metrin syvyydessä, mikä ilmenee taulukoista 37 ja 38 ja kuvista 38 ja 39. Vaikka kuparipitoisuudet eivät ole yhtä suuret kuin aikaisemman pilaantumisselvityksen suurimmat arvot, ylittyy pilaantumisselvityksiin käytetty ylempi ohjearvo, joka on esitetty taulukossa 24. Myös taulukossa 22 ja 23 esitetyt MARA-asetuksen ja Eviran raskasmetallirajat tuhille ylittyvät.

Galvaanisten parien muodostuminen teräspaalun kanssa on siis huomioitava lisäriski. Mitä suurempina kappaleina täytössä esiintyvä metalli on, sitä suuremmaksi tämän korroosiomuodon merkitys kasvaa. Metallipitoisuuksien yleinen kasvu 1,5 metriä maanpinnan alta kertoo lisäksi siitä, että maatäyttö alueella on vaihtelevaa ja voi siten korroosion kannalta olla mahdollisesti hyvinkin aggressiivista. Luvussa 7.1 esitettyjen tietojen nojalla voidaan olettaa, että tutkittavan alueen maaperä lukeutuu Eurokoodi 3 mukaisiin tiivistämättömiin, aggressiivisiin täyttöihin.

Galvaanisten sarjojen nojalla on kuitenkin syytä huomata myös, että taulukoissa 37 ja 38 ja kuvissa 38 ja 39 esiintyvistä metalleista sinkki on epäjaloin. Tämän mukaisesti sinkki syöpyisi ensimmäisenä ja uhrautuisi ennen terästä galvaanisessa korroosiossa. Koska sinkki ei kuitenkaan ole teräksen pinnalla, on vaikea arvioida, kuinka suojaava vaikutus sinkillä on suhteessa maaperän kupariin tai lyijyyn.



## 8.2 Potentiostaattimittaukset

Potentiostaattilaitteistolla määritetyistä polarisaatiokäyristä pystytään päättämään jonkin verran paaluissa käytettyjen rakenneterästen korroosiokäyttäytymisestä niissä ympäristöissä, joihin paalut on lyöty. Selkein havainto kuvien 72 ja 73 käyristä on, ettei kummallakaan tutkituista rakenneteräslaaduista esiinny passivaatioilmiötä eli jännitteen kasvassa virrantiheys pysyisi vakiona. Esimerkiksi ruostumattomien terästen polarisaatiokäyrissä tällainen käyttäytyminen ilmenee selkeästi.

Toisaalta passivaatiokäyttäytymistä ei myöskään varsinaisesti odotettu havaittavan, sillä sitä ei esiinny rakenneteräksillä. Tutkimuksen kannalta merkittävämpää oli tutkia, onko eri rakenneteräslaaduilla havaittavissa eroja korroosionopeudessa. Kuvien 72 ja 73 perusteella tutkittujen teräslaatujen välillä ei ole käytetyissä liuoksissa merkittävää eroa korroosionopeuden suhteen.

Vertailemalla kuvien 72 ja 73 käyrien käyttäytymistä voidaan todeta, että molempien rakenneterästen korroosiokäyttäytyminen on käytännössä samanlainen. Mekaanisten ominaisuuksien muuttuminen ei siis vaikuta näiden terästen korroosio-ominaisuuksiin. Korroosion tiedetäänkin riippuvan koostumuksesta ja raekoosta eikä tutkittujen teräslaatujen välillä ollut näiden suhteen merkittävää eroa. Selkeimmin tämä näkyi 3,5 % NaCl-referenssiliuoksella tehdyissä mittauksissa, jotka on esitetty kuvassa 74. Referenssiliuoksella tehdyt mittaukset ovat luotettavimmat, sillä eri rakenneterästen potentiostaattimittaukset tehtiin eri aikoihin ja korroosioympäristöstä otetuista vesinäytteistä on näiden mittausten välisenä aikana voinut haihtua korroosioon vaikuttavia yhdisteitä tai ne ovat voineet reagoida ympäröivän atmosfäärin hapen kanssa muodostaen uusia yhdisteitä.

Kuvasta 74 voidaan lisäksi nähdä käytetyn Temaline NL -epoksimaalipinnoitteen vaikutus korroosiovirtaan. Maalipinnoitetulla näytteellä korroosiopotentiaali ja -virrantiheys ovat selvästi pienemmät kuin pinnoittamattomilla teräsnäytteillä. Maalipinnoitteen tarkoitus on estää korroosiovirran kulku. Kuvan 74 mukainen käyttäytyminen potentiostaattimittauksessa osoittaa, että maalipinnoite on niin tiivis, että virran kulku vaikeutuu, vaikka se ei täysin estykään. Potentiostaattimittaus soveltuukin juuri tiiveyden tarkasteluun ja pinnoite käyttäytyy potentiostaattimittauksissa juuri kirjallisuuden osoittamalla tavalla [110].

## 8.3 Seinämävahvuuden korroosioestimaatti

Jos oletetaan, että teräsputkipaalujen korroosiokäyttäytyminen maaperässä on lineaarista 100 vuoden aikajänteellä, voidaan tehdä jatkotutkimusten syöpymätuloksille alustavat estimaatit. Nämä arviot mittaustarkkuuksineen on esitetty taulukoissa 58 ja 59. Laskennalliset tulokset kahden vuoden jälkeiselle syöpymälle jätettiin taulukosta pois, sillä niiden vaihteluvälit eri pitkäaikaistulosten välillä olivat niin pieniä, että ne eivät anna luotettavia tuloksia.

**Taulukko 58.** Lineaariset arviot korroosiolle eri altistusaikojen jälkeen.

Mittaus- tarkkuus (mm)	Syöpymä 2 mm/100 a			Syöpymä 3 mm/100 a		
	5 vuotta	10 vuotta	15 vuotta	5 vuotta	10 vuotta	15 vuotta
0,1	0,05-0,15	0,15-0,25	0,25-0,35	0,1-0,2	0,25-0,35	0,4-0,5
0,05	0,07-0,13	0,17-0,23	0,27-0,33	0,13-0,18	0,27-0,33	0,42-0,48
0,02	0,09-0,11	0,19-0,21	0,29-0,31	0,14-0,16	0,29-0,31	0,44-0,46

**Taulukko 59.** Lineaariset arviot korroosiolle eri altistusaikojen jälkeen.

Mittaus- tarkkuus (mm)	Syöpymä 4 mm/100 a			Syöpymä 5 mm/100 a		
	5 vuotta	10 vuotta	15 vuotta	5 vuotta	10 vuotta	15 vuotta
0,1	0,15-0,25	0,35-0,45	0,55-0,65	0,2-0,3	0,45-0,55	0,7-0,8
0,05	0,17-0,23	0,37-0,43	0,57-0,63	0,22-0,28	0,47-0,53	0,72-0,78
0,02	0,19-0,21	0,39-0,41	0,59-0,61	0,24-0,26	0,49-0,51	0,74-0,76

On syytä kuitenkin huomata, että korroosionopeus maaperässä ei ole lineaarinen, vaan on havaittu [67], että se on ajan myötä hidastuvaa. Tämä hidastuvuus on myös havaittavissa aiemmin esitettyssä taulukossa 20, johon on listattu Eurokoodin mukaiset keskimääräiset pinnan syöpymät suojaamattomille teräspaaluille, niiden arvojen kohdalla, jotka perustuvat mittauksiin eivätkä lineaariseen ekstrapolointiin. Korroosionopeus onkin luultavasti suurempaa alkuvaiheessa kuin myöhemmin.

Jos taulukossa 20 esitettyjä aggressiivisten luonnonmaiden ja tiivistämättömien, aggressiivisten täyttöjen 5 ja 25 vuoden keskimääräisiä pinnan syöpymäarvoja käytetään lähtökohtana ja oletetaan tälle välille lineaarinen kehitys, saadaan taulukossa 60 esitetyt arvot. Näitä voidaan käyttää taulukoiden 58 ja 59 arvioiden ja jatkotutkimuksissa saatujen mitausarvojen vertailuun.

**Taulukko 60.** Lineaariset arviot korroosiolle perustuen Eurokoodissa 3 esitettyihin syöpymätietoihin.

Mittaus- tarkkuus (mm)	Aggressiiviset luonnonmaat Syöpymä 3,25 mm/100 a			Tiivistämättömät, aggressiiviset täytöt Syöpymä 5,75 mm/100 a		
	5 vuotta	10 vuotta	15 vuotta	5 vuotta	10 vuotta	15 vuotta
0,1	0,15-0,25	0,35-0,45	0,55-0,65	0,45-0,55	0,82-0,92	1,20-1,30
0,05	0,17-0,23	0,37-0,43	0,57-0,63	0,47-0,53	0,84-0,90	1,22-1,28
0,02	0,19-0,21	0,39-0,41	0,59-0,61	0,49-0,51	0,86-0,88	1,24-1,26

Taulukoissa 58 ja 59 arvioidut syöpymät ovat suhteessa pieniä verrattuna taulukon 60 tiivistämättömien, aggressiivisten täyttöjen arvoihin. Aggressiivisten luonnonmaiden arvot vastaavat taulukon 59 4 mm/100 a arvoja, mutta taulukosta 20 voidaan huomata, että 100 vuodelle tällaisessa maaperässä on arvioitu 3,25 mm syöpymä. Tämä kertoo korroo-

sionopeuden epälineaarisuudesta ja hidastuvuudesta. Näitä syöpymääräviä on syytä tarkentaa, kun tutkimusta varten upotettuja paaluja nostetaan ja analysoidaan pitkäaikaistutkimuksen seuraavassa vaiheessa.

## 9. JATKOTUTKIMUKSET

Tämä diplomityö on osa Helsingin kaupungin Kyläsaaren alueen maaperän korroosiovaikutusta selvittävää pitkäaikaistutkimusta. Tässä luvussa esitellään lyhyesti tutkimuksen seuraavien vaiheiden suunnitelmia. Esitetyt suunnitelmat ovat alustavia ja päivittyvät tutkimuksen seuraavissa vaiheissa.

Jatkotutkimusten aikataulujen ja suunniteltujen mittausten lisäksi käsitellään työhön liittyvien referenssinäytteiden, mittausdatan ja muun työhön liittyvän aineiston säilyttämistä. Aineiston säilyttäminen on jatkotutkimusten kannalta tärkeää, jotta tarpeettomia virhelähteitä voidaan eliminoida ja jotta vielä 15 vuoden kuluttua pitkäaikaistutkimuksen viimeisessä vaiheessa olisi selvää, mitä on tehty, vaikka tutkimukseen liittyvää henkilöstöä on vaihtunut. Lisäksi aineisto pitää olla luettavissa myös, vaikka tietokonejärjestelmät ja -ohjelmistot kehittyvät.

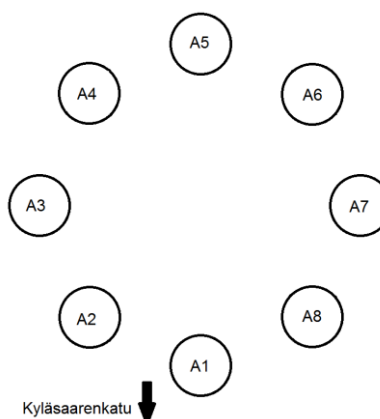
### 9.1 Jatkotutkimusten aikataulu

Tähän korroosiotutkimukseen liittyvät jatkotutkimukset on tarkoitus tehdä neljässä vaiheessa. Seuraava vaihe on ensimmäisten teräsputkipaalujen nostaminen Kyläsaaresta 2017. Tällöin jokaisesta kolmesta tutkimuspisteestä nostetaan tutkittavaksi numerojärjestyksessä ensimmäiset kaksi paalua eli paalut, jotka on merkitty A1, A2, B1, B2, C1 ja C2. Paalujen sijainnit paalukehissä käyvät ilmi kuvista 82-84 ja paalukehien sijainnit näkyvät kuvassa 37. On suositeltavaa, että tämä nostovaihe tehtäisiin lokakuussa, jotta paalut olisivat altistuneet korroosioympäristölle mahdollisimman tarkkaan kaksi vuotta.

Alustava aikataulu korroosiotutkimuksen muille nostovaiheille on viiden vuoden välein paalutustyöstä laskettuna eli 2020, 2025 ja 2030. Näiden tutkimusvaiheiden aikataulut voivat kuitenkin muuttua tai tarkentua vielä vuoden 2017 tutkimuksen yhteydessä tai myöhemmin. Alustava yhteenveto eri vuosina nostettavista ja tutkittavista paaluista on esitetty taulukossa 61.

**Taulukko 61.** Ehdotus nostettavista ja tutkittavista paaluista jaettuna eri tutkimusvuosille

Tutkimusvuosi	Tutkittavat paalut
2017	A1, A2, B1, B2, C1 ja C2
2020	A3, A4, B3, B4, C3 ja C4
2025	A5, A6, B5, B6, C5 ja C6
2030	A7, A8, B7, B8, C7 ja C8



### 9.1.1 Jatkotutkimusten mittaukset ja tutkimussuunnitelma 2017

Syksyllä 2017 nostetaan esitetyn aikataulun mukaisesti ensimmäiset teräsputkipaalut. Nostotyö on syytä dokumentoida riittävällä tarkkuudella ja kirjata ylös, jos paalujen nostamiseen maasta liittyy jotain poikkeavaa. Työn ja erityisesti paalujen valokuvaaminen on tärkeää, koska korroosioympäristössä olleet teräsputkipaalut leikataan pienempiin osiin mittauksia varten ja niiden ulkopinta voi kärsiä esimerkiksi niitä siirrettäessä tai käsiteltäessä.

Pitkäaikaistutkimuksen seuraavassa vaiheessa vuonna 2017 sekä myöhemmissä vaiheissa paaluelementtejä on tutkittava ainakin samoin menetelmin kuin referenssipaaluja tämän työn yhteydessä. Ehdotetut mittausmenpiteet paaluelementeille on esitetty taulukossa 62.

**Taulukko 62.** Ehdotettuja mittausmenpiteitä jatkotutkimuksiin

Mittausmenpide	Käsitelty tässä työssä
Seinämävahvuusmittaus	Luvussa 7.4.1
Metripainomittaus	Luvussa 7.4.3
Pintojen optinen profilometria	Luvussa 7.4.4
3D-laserskannaus	Luvussa 7.4.5
Maalipinnoitteen potentiostaattimittaus	Luvussa 7.4.6
Optinen mikroskopia	Ei käsitelty
Pyyhkäisyelektronimikroskopia	Ei käsitelty

Pienempiin osiin jaetuista putkipaaluelementeistä täytyy dokumentoida tarkemmin niiden ulkonäkö ja pyrkiä karakterisoimaan korroosiotyyppi, eli missä määrin korroosio on yleistä korroosiota, kuoppakorroosiota ja pistemäistä korroosiota sekä kuinka eri korroosiotyyppien esiintyminen on jakaantunut elementtien pituudella. Korroosiotyyppi pitäisi

pystyä yhdistämään siihen tarkempaan korroosioympäristöön, eli esimerkiksi vallitsevaan maalajiin, jossa paaluelementti on ollut, mutta tämä ei välttämättä ole mahdollista vielä kahden vuoden korroosioaltistuksen jälkeen.

Erityisesti seinämävahvuus- ja metripainomittauksilla pyritään korroosionopeuden arviointiin ja sen perusteella 100 vuoden ajalla tapahtuvan korroosion estimoinnin tarkentamiseen. Optista mikroskopiaa ja elektronimikroskopiaa on syytä käyttää, jotta voidaan karakterisoida, esiintyykö syöpymistä esimerkiksi putkipaalujen hitsisaumassa poikkeavassa määrin verrattuna valssattuun perusaineeseen. Lisäksi esimerkiksi mahdolliset yksittäiset syvemmät pistemäiset syöpymät on tarkasteltava näillä menetelmillä.

Jos maaperästä nostettavissa maalatuissa teräsputkipaaluissa on jäljellä ehjää, yhtenäistä maalipintaa, on tästä syytä tehdä potentiostaattimittaus, jotta voidaan selvittää, onko maalipinta yhtä tiivis kuin tässä alkuselvityksessä. Potentiostaattimittauksen toteuttamatta jättämistä on syytä harkita, jos maalatut paalupinnat ovat silmämääräisesti arvioituna vaurioituneet mekaanisesti niin paljon, ettei maalikerroksella ole kokonaistutkimuksen kannalta merkitystä. Maalaamattomista teräsnäytteistä tätä mittausta ei tarvitse tehdä.

Mittaustulosten perusteella jatkotutkimuksissa pyritään kehittämään korroosiomalli aggressiivisessa täytössä tapahtuvalle korroosiolle ja arvioida korroosion vaikutusta teräsputkipaalujen kuormankantokykyyn tämän mallin perusteella. Näiden vaiheiden toteutuminen on kuitenkin tuskin mahdollista vielä 2017 ja ne siirtynevät vuosien 2020-2030 tutkimusvaiheisiin.

### **9.1.2 Maaperä- ja vesianalyysit jatkotutkimuksissa**

Tässä pitkäaikaistutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa paalutuspisteiden maaperästä ja orsivedestä tehtiin laboratoriossa kemiallisia analyysejä sekä hyödynnettiin aikaisemmin tehdyssä pilaantumisselvityksessä käytettyjä analyysejä. Samat laboratorioanalyysit sisältäen esimerkiksi sähkönjohtavuuden, pH ja eri kemialliset alkuaineet ja yhdisteet on syytä tehdä myös vuoden 2017 tutkimuksessa sekä myöhemmissä vaiheissa.

Vesianalyysijä Kyläsaaren alueella sijaitsevista orsivesipisteistä 010 Hermannin, 31P FCG3042 ja 04P FCG3041 suositellaan tehtäväksi jo tämän aloitustutkimuksen ja seuraavan tutkimusvaiheen välissä. Aikaisemmassa Helsingin kaupungin teettämässä seuranta-tutkimuksessa [119; 128] vesinäytteenotto on ollut noin puolivuositaita ajoittuen keväällä huhtikuusta kesäkuuhun ja syksyllä loka-marraskuulle. Tällainen aikataulutus on syytä pitää myös tässä pitkäaikaistutkimuksessa ja tällöin vuoden 2017 paalujen nostoon mennessä orsivesinäytteitä olisi otettu neljä: keväällä 2016, syksyllä 2016, keväällä 2017 ja syksyllä 2017. Syksyllä 2017 orsivesinäytteet olisi otettava ennen paalujen nostamista maasta, jotta varmistetaan, ettei vesi häiriinny nostotoimenpiteestä.

Orsivesinäytteistä tutkimuspisteen 010 Hermannin mittaukset ovat ensisijaisen tärkeitä, sillä tämän pisteen näytteenottoputki asennettiin tämän työn yhteydessä. Tästä mittauspisteestä saadut tulokset, kuten luvussa 7.1.4 taulukon 45 yhteydessä todettiin, olivat siinä määrin muiden orsivesinäytepisteiden aikaisemmista tuloksista poikkeavia, että on syytä epäillä vesinäytteen olleen putken asennustyöstä häiriintynyttä eivätkä taulukon 45 tulokset edusta näytepisteen orsiveden pitkäaikaisia ominaisuuksia.

Jos vain on toteutettavissa, voisi olla syytä tutkia myös maahan asennettuihin teräsputkipaaluuihin sisälle kertyvä vesi. Jatkotutkimusten käytännön järjestelyiden kannalta tämä tarkoittaisi sitä, että ennen kuin seuraavissa vaiheissa näitä putkipaaluja nostetaan, leikat-taisiin niiden yläpää hitsatun tunnistekiekon alta auki. Tämän jälkeen mitattaisiin veden sijainti paalun sisällä ja pumpattaisiin sisältä vesinäyte. Jos tällainen vesinäyte otetaan, pitää se toimittaa analysoitavaksi hyvin nopeasti, jotta hapelle altistuminen ei aiheuta näytevedessä liikaa kemiallisia muutoksia.

## 9.2 Referenssinäytteiden ja datan säilytys

Teräsputkipaaluelementeistä kaksi, elementit tunnistenumeroilla 1 ja 26, säilytetään Tampereen teknillisen yliopiston Festia-rakennuksessa paperinjalostusosaston tilassa FE208, joissa ilmasto-olosuhteet ovat vakiot. Säilytyksen ja jatkotutkimuksiin liittyvän siirtä-misen helpottamiseksi 6 m elementit ovat leikattuina noin 2 m osiksi.

Luvussa 7.5 mainitaan, että Helsingin kaupungin pitkäaikaistutkimukseen, jonka osa tämä diplomityö on, liittyy lisäksi teräsbetonipaaluja. Vaikka niitä ei käsitellä tässä työssä, myös näistä teräsbetonipaaluista säilytetään referenssinäytteet Tampereen teknil-lisellä yliopistolla Materiaaliopin laitoksen tiloissa. Betonin kuivumiskäyttäytymisen vuoksi osa referenssinäytteistä säilytetään ulkotiloissa ja osa sisätiloissa.

Tämän diplomityön yhteydessä kerätty sähköinen materiaali säilytetään Tampereen tek-nillisen yliopiston sisäisellä, säännöllisin väliajoin varmuuskopioidulla levytilalla jatko-tutkimuksia varten. Tälle levytilalle tallennetaan myös työtä varten tehdyt mittaustulok-set.

Helsingin kaupungille toimitetaan sähköinen materiaali pdf-tiedostoina. Paperiversiona toimitetaan tämän diplomityön painettu kappale.

## 10. YHTEENVETO

Tämä diplomityö on tehty osana Helsingin kaupungin toteuttamaa pitkäaikaistutkimusta, jossa tarkoituksena on selvittää Kyläsaaren alueen maaperän pohjarakennuskelpoisuutta korroosion näkökulmasta. Tämä pitkäaikaistutkimus toteutetaan nykyisellään 15 vuoden aikajänteellä vuosien 2015-2030 aikana ja sen tulosten perusteella pyritään tekemään mahdollisimman luotettavaa arviota maaperän aiheuttamasta korroosiosta 100 vuoden aikana.

Vanhankaupungin selkää on täytetty varsinaisen Kyläsaaren ympäriltä 1900-luvun aikana. Pitkäaikaistutkimuksen tutkimuskohde, jota tässäkin diplomityössä käsitellään, sijaitsee nykyisten Kyläsaaren ja Hermanninrannan alueilla. Suurin osa näiden alueiden täytöstä sijoittuu 1940-1970-luvuille ja täyttö on ollut sekalaista sisältäen esimerkiksi alueella toimineen polttolaitoksen tuottamaa tuhkaa. Täytön alapuolella on savimaata, joka on muodostunut jääkauden jälkeen. Tyypillisesti nämä savet ovat hyvin sulfidipitoisia ja sisältävät anaerobisesti eläviä bakteereja.

Rakentamista säätelevien Eurokoodi-standardien mukaan tuhkat ja kuonat määritellään aggressiivisiksi täyttömateriaaleiksi. Teräspaaluille on tällaisissa olosuhteissa arvioitu jopa yli 5 mm korroosio 100 vuoden ajalle. Vastaavasti aggressiivisille luonnonmaille tämä korroosioarvio on yli 3 mm/100 vuotta.

Teräksen korroosio on sähkökemiallinen prosessi, joka vaatii toteutuakseen virtaa kuljetavan elektrolyyttiliuoksen. Maaperässä tämä on mahdollista, sillä Suomen olosuhteissa maa on aina jossain määrin kostea ja maalajien rakeiden välissä on huokosvettä, vaikka esimerkiksi pohjavesi esiintyisi vasta selvästi syvemmillä.

Maaperässä teräksen korroosioon vaadittava sähkökemiallinen reaktio syntyy yleensä joko toisen jalomman metallin, kuten kuparin, läsnä ollessa tai paikallisen korroosioympäristön poiketessa muusta maaperästä esimerkiksi happipitoisuudeltaan. Ensimmäistä korroosiotyyppiä kutsutaan yleensä galvaaniseksi korroosioksi ja jälkimmäistä väkevyys-erokorroosioksi.

Maaperässä tapahtuvaa korroosiota tutkittaessa arvioidaan yleensä maan eri ominaisuuksia kuten esimerkiksi esiintyviä maalajeja ja maaperän koostumusta, happipitoisuutta, ominaisvastusta ja pH-arvoa. Näistä yleisin on ominaisvastus, joka sähkönsiirtoisuuden käänteislukuna kuvastaa sitä, kuinka maaperä vastustaa sähkövirran kulkua. Tämä suure on kääntäen verrannollinen sähköä johtavien liukoisten suolojen, kuten kloridien ja sulfaattien, pitoisuuteen. Yleensä arvioidaan, että maaperä on hyvin syövyttävää, jos ominaisvastuksen arvo on 10  $\Omega$ m tai alle.



Maan syövyttävyyden ei kuitenkaan riipu koskaan pelkästään yksittäisestä muuttujasta, vaan se on monimutkainen kokonaisuus koostuen maan ja siinä esiintyvän veden eri ominaisuuksien yhteisvaikutuksesta, jota ei ole vielä täysin aukottomasti pystytty mallintamaan. Tätä vaikeuttaa entisestään mikrobiologiset tekijät. Maaperän happipitoisuudesta riippuen siinä voi esiintyä aerobisia tai anaerobisia bakteereja, jotka voivat kiihdyttää korroosiota esimerkiksi rautametalleilla. Tällaisia bakteereja ovat myös ne, joita tiedetään esiintyvän tämän pitkäaikaistutkimuksen kaltaisessa maaperässä.

Maaperässä tapahtuvaa korroosiota on tutkittu aikaisemmin paitsi Suomessa myös esimerkiksi Ruotsissa ja Yhdysvalloissa. Näissä tutkimuksissa on varmentunut juuri ilmiön monimutkaisuus riippuen vallitsevasta ympäristöstä ja mitatut tulokset ovat olleet vaihtelevia. Tämän diplomityön aloittama pitkäaikaistutkimus poikkeaa aikaisemmista tutkimuksista esimerkiksi siinä, että nyt käytetyt koekappaleet ovat todellisia paaluja eli maahan pystysuunnassa asennettuja suuria kappaleita, kun taas yleensä tutkitut koekappaleet ovat olleet pienempiä ja ne on asennettu johonkin ennalta määritellyyn syvyyteen vaakatasossa.

Tätä diplomityötä varten tehdyissä mittauksissa varmentui, että pitkäaikaistutkimukseen valittua maaperää voidaan pitää aggressiivisena. Tätä tuki erityisesti maaperänäytteiden korkeat sähkönjohtavuusarvot. Lisäksi maaperänäytteistä tehdyt kemialliset analyysit osoittavat, että alueen täyttömaa sisältää eri metallien pitoisuuksia tavallista enemmän. Esimerkiksi kuparia on havaittu näytteissä siinä määrin, että galvaanisen korroosion mahdollisuus on olemassa.

Korroosiotutkimukseen valittua S550J2H-rakenneterästä verrattiin myös S440J2H-rakenneteräkseen. Mekaanisilta ominaisuuksiltaan S550J2H-rakenneteräksen myötö- ja murtolujuusarvot ovat S440J2H-rakenneterästä korkeammat ja haluttiin selvittää, onko näiden teräslaatuojen välillä korroosion kannalta merkittävää eroa. Pitkäaikaistutkimuksen ympäristöstä pumpatulla vedellä sekä 3,5 % NaCl-referenssiluoksella tehdyt potentiaastittaukset osoittivat, ettei näiden teräslaatuojen välillä ole käytännössä eroa.

Jatkotutkimuksia varten mitattiin asennettujen paalujen seinämäpaksuuksia ja korroosiosuojamaalikerrosten paksuuksia sekä referenssipaalun pituusmassa ja pintaprofiili. Näitä mittaustuloksia verrataan pitkäaikaistutkimuksen seuraavissa vaiheissa vuosina 2017, 2020, 2025 ja 2030 saataviin mittaustuloksiin.

Helsingin kaupungin toteuttaman pitkäaikaistutkimuksen seuraava vaihe on vuonna 2017, jolloin nostetaan maasta ensimmäiset tämän diplomityön yhteydessä maahan asennetut paalut. Näistä paaluista tarkastetaan, ilmeneekö korroosiota siinä määrin, että sitä pystyy mittavälineiden mittaustarkkuudella mittaamaan. Samalla pystytään tarkastamaan epoksimaalattujen pintojen kunto ja arvioimaan niiden jatkotutkimusmahdollisuudet. Vuonna 2017 tarkennetaan myös korroosiotutkimuksen vuosina 2020-2030 tehtäviä mittaustoimenpiteitä.

## LÄHTEET

- [1] S. Yläsaari, 1 Korroosio ja korroosionesto, sisältyy: P.J. Tunturi (toim.), Korroosio-käsikirja, 3. p., Kunnossapitoyhdistys ry, Helsinki, 2006, s. 17-24.
- [2] T. Riihimäki, Pienpaalujen asentaminen kevyillä lyöntilaitteilla, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2005, 155 s. + liitteet 24 s.
- [3] SSAB teräspaalut, SSAB, 2015, 16 s. Saatavissa: [http://websitecdn.ssab.com/-/media/Files/FI/Infra/SSAB\\_RRs-paalut\\_FI.pdf](http://websitecdn.ssab.com/-/media/Files/FI/Infra/SSAB_RRs-paalut_FI.pdf).
- [4] Teräspaalutus on kevyt ja nopea toteuttaa, Sanoma Media Finland Oy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22.4.2016): [http://www.rakentaja.fi/artikkelit/12497/teraspaalutus\\_nopea\\_kevyt\\_ruukki\\_ssab.htm](http://www.rakentaja.fi/artikkelit/12497/teraspaalutus_nopea_kevyt_ruukki_ssab.htm).
- [5] Teräspaalutuksen edut, Auranmaan Teräspaaluttajat Oy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22.4.2016): <http://www.teraspaaluttajat.fi/teraspaalutuksen-edut.html>.
- [6] P. Vuori, S. Laakso, Helsingin ja Helsingin seudun väestöennuste 2015–2050. Ennuste alueittain 2015–2025. Tilastoja 2015 33, Helsingin kaupungin tietokeskus, Helsinki, 2015, 30 s. + liitteet 59 s. Saatavissa: [http://www.hel.fi/hel2/tietokeskus/julkaisut/pdf/15\\_10\\_05\\_Tilastoja\\_33\\_Vuori\\_Laakso.pdf](http://www.hel.fi/hel2/tietokeskus/julkaisut/pdf/15_10_05_Tilastoja_33_Vuori_Laakso.pdf).
- [7] Väestö ja väestönmuutokset, Helsingin kaupunki, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.4.2016): <http://www.hel.fi/www/Helsinki/fi/kaupunki-ja-hallinto/tietoa-helsingista/tilastot-ja-tutkimukset/vaesto/vaesto-ja-vaestonmuutokset/>.
- [8] J. Törnqvist, L. Carpén, Keski-Pasilan maaperäkorroosion arvioinnin täydentäminen kiskonäytteiden analyysituloksilla, VTT-CR-00410-15, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Espoo, 2015, 24 s. + liitteet 7 s.
- [9] Uutiset / Arabianranta valmistuu, Helsingin kaupunginkanslia, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.4.2016): <http://www.uuttahelsinkia.fi/fi/uutiset/2015-08-24/arabianranta-valmistuu>.
- [10] Rakentaminen / Kalasataman rakentaminen jatkuu etelään ja pohjoiseen, Helsingin kaupunginkanslia, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.4.2016): <http://www.uuttahelsinkia.fi/fi/kalasatama/rakentaminen/kalasataman-rakentaminen-jatkuu-etelaan-ja-pohjoiseen>.
- [11] Z. Ahmad, Chapter 2 - Basic Concepts in Corrosion, in: Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control, Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom, 2006, pp. 9-56.
- [12] T. Kaunisto, 9.1 Ilmakehä, sisältyy: P.J. Tunturi (toim.), Korroosio-käsikirja, 3. p., Kunnossapitoyhdistys ry, Helsinki, 2006, s. 224-228.

- [13] SFS-EN ISO 12944-2, Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. Osa 2: Ympäristöolosuhteiden luokittelu, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 1998, 20 s.
- [14] SFS-EN ISO 9223, Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Classification, determination and estimation, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2012, 19 p.
- [15] S. Kurkela, 9.3.1 Luonnon vedet, sisältyy: P.J. Tunturi (toim.), Korroosiokäsikirja, 3. p., Kunnossapitoyhdistys ry, Helsinki, 2006, s. 247-265.
- [16] J. Uusi-Kämpä, S. Virtanen, R. Rosendahl, P. Österholm, M. Mäensivu, V. Westberg, K. Regina, K. Ylivainio, M. Yli-Halla, P. Edén, E. Turtola, Ympäristöriskien vähentäminen happamalla sulfaattimailla - Opas pohjaveden pinnan säätämiseksi, MTT Raportti 74, Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus MTT, Jokioinen, 2013, 26 s. Saatavissa: <http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti74.pdf>.
- [17] Aggressiivinen hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), VTT Expert Services Oy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.2.2016): <http://www.vttexpertservices.fi/palvelut/testaus-ja-tarkastus/rakentamisen-tuotteet-ja-materiaalit/rakennusmateriaalien-testaus/betoni-rakennusmateriaalit/betoni-laasti-tasoite/kunto/kemialliset-rasitukset/hiilidioksidi>.
- [18] P. Siitonen, 5 Passivaatio ja korroosion ilmenemismuodot, sisältyy: P.J. Tunturi (toim.), Korroosiokäsikirja, 3. p., Kunnossapitoyhdistys ry, Helsinki, 2006, s. 90-125.
- [19] A. Nikula, 8 Korroosion torjuntakeinoja korroosion estämiseksi esiintymismuodoittain, sisältyy: P.J. Tunturi (toim.), Korroosiokäsikirja, 3. p., Kunnossapitoyhdistys ry, Helsinki, 2006, s. 165-220.
- [20] A. Kyröläinen, 10.2 Ruostumattomat teräkset, sisältyy: P.J. Tunturi (toim.), Korroosiokäsikirja, 3. p., Kunnossapitoyhdistys ry, Helsinki, 2006, s. 455-487.
- [21] Z. Ahmad, Chapter 4 - Types of Corrosion: Materials and Environments, in: Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control, Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom, 2006, pp. 120-270.
- [22] T. Leino, E. Häkkä-Rönnholm, J. Nieminen, H. Koukkari, J. Hieta, E. Vesikari, J. Törnqvist, Teräsrakenteiden käyttöikäsuunnittelu, VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1937, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 1988, 119 s. + liitteet 11 s.
- [23] M.G. Fontana, N.D. Greene, Corrosion engineering, 2. ed. McGraw-Hill, New York, USA, 1978, 465 p.
- [24] H.E. Boyer, T.L. Gall, Metals handbook, Desk ed. American Society for Metals, Metals Park, OH, USA, 1985, 1360 p.
- [25] S. Kurkela, 9.4 Höyry ja lauhdevesi, turbiini, sisältyy: P.J. Tunturi (toim.), Korroosiokäsikirja, 3. p., Kunnossapitoyhdistys ry, Helsinki, 2006, s. 271-305.

- [26] G.P. Tsinker, Port Engineering: Planning, Construction, Maintenance, and Security, John Wiley & Sons Inc, New York, USA, 2004, 896 p.
- [27] J.B. Bushman, T.E. Mehalick, Statistical Analysis of Soil Characteristics to Predict Mean Time to Corrosion Failure of Underground Metallic Structures, in: V. Chaker, J.D. Palmer (ed.), Effects of Soil Characteristics on Corrosion, ASTM STP 1013, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 1989, pp. 107-118.
- [28] R. Korhonen, O. Hietanen, 9.6 Maaperä, sisältyy: P.J. Tunturi (toim.), Korroosio-käsikirja, 3. p., Kunnossapitoyhdistys ry, Helsinki, 2006, s. 317-322.
- [29] Z. Ahmad, Chapter 5 - Cathodic Protection, in: Z. Ahmad (ed.), Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control, Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom, 2006, pp. 271-351.
- [30] SFS-EN 1097-5, Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 5: Kosteuspitoisuuden määrittäminen kuivaamalla tuuletetussa lämpökaapissa, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2008, 11 s.
- [31] N. Ronkainen, Suomen maalajien ominaisuuksia, Suomen ympäristö 2/2012, Suomen ympäristökeskus (SYKE), Helsinki, 2012, 62 s. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38773/SY2\\_2012\\_Suomen\\_maalajien\\_ominaisuuksia.pdf](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38773/SY2_2012_Suomen_maalajien_ominaisuuksia.pdf).
- [32] E. Passaglia, A Unique Institution: The National Bureau of Standards, 1950-1969, U.S. Dept. of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA, 1999, 822 p.
- [33] SFS-EN ISO 14688-1, Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan tunnistaminen ja luokitus. Osa 1: Tunnistaminen ja kuvaus, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2003, 17 s.
- [34] K. Korhonen, R. Gardemeister, M. Tammirinne, Geotekninen maaluokitus, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 1974, 20 s. + liitteet 12 s.
- [35] Soveltamisohje: ISO-maaluokituksen soveltamisohje Suomessa, Suomen Geoteknillinen Yhdistys, Espoo, 2012, 21 s. + liitteet 4 s.
- [36] Pohjarakennusohjeet, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, Helsinki, 2004, 137 s.
- [37] V. Salonen, M. Eronen, M. Saarnisto, Käytännön maaperägeologia, Kirja-Aurora, Turku, 2002, 237 s.
- [38] E. Escalante, Concepts of Underground Corrosion, in: V. Chaker, J.D. Palmer (ed.), Effects of Soil Characteristics on Corrosion, ASTM STP 1013, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 1989, pp. 81-94.

- [39] P.A. Burda, Differential Aeration Effect on Corrosion of Copper Concentric Neutral Wires in the Soil, in: V. Chaker, J.D. Palmer (ed.), Effects of Soil Characteristics on Corrosion, ASTM STP 1013, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 1989, pp. 18-36.
- [40] T.V. Edgar, In-Service Corrosion of Galvanized Culvert Pipe, in: V. Chaker, J.D. Palmer (ed.), Effects of Soil Characteristics on Corrosion, ASTM STP 1013, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 1989, pp. 133-143.
- [41] J.D. Palmer, Environmental Characteristics Controlling the Soil Corrosion of Ferrous Piping, in: V. Chaker, J.D. Palmer (ed.), Effects of Soil Characteristics on Corrosion, ASTM STP 1013, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 1989, pp. 5-17.
- [42] J.H. Fitzgerald III, The Future as a Reflection of the Past, in: V. Chaker, J.D. Palmer (ed.), Effects of Soil Characteristics on Corrosion, ASTM STP 1013, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 1989, pp. 1-4.
- [43] Paalutusohje 2011, PO-2011: Osa 1: Suunnittelun perusteet, Osa 2: Paalutusohje, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, Helsinki, 2011, 261 s.
- [44] G. Camitz, T.G. Vinka, Corrosion of Steel and Metal-Coated Steel in Swedish Soils – Effects of Soil Parameters, in: V. Chaker, J.D. Palmer (ed.), Effects of Soil Characteristics on Corrosion, ASTM STP 1013, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Yhdysvallat, 1989, pp. 37-53.
- [45] J. Havukainen, A. Hämäläinen, A. Latvala, Tuhkaprojektin loppuraportti - Kivihiihtuhkien käyttökokeemukset kunnallistekniikan maarakenteissa, Geoteknisen osaston tiedote 45, Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, geotekninen osasto, Helsinki, 1987, 84 s.
- [46] Pienpaalutusohje PPO-2007: teräksiset lyönti-, pora- ja puristuspaalut, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, Helsinki, 2007, 226 s.
- [47] K.P. Fischer, O.R. Bryhn, Corrosion and Corrosion Evaluation of Superficial Sediments on the Norwegian Continental Shelf, in: V. Chaker, J.D. Palmer (ed.), Effects of Soil Characteristics on Corrosion, ASTM STP 1013, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Yhdysvallat, 1989, pp. 119-132.
- [48] J.R. Postgate, The sulphate-reducing bacteria, Repr. ed. Cambridge U.P, Cambridge, United Kingdom, 1981, 151 p.
- [49] E. Ilhan-Sungur, N. Cansever, A. Cotuk, Microbial corrosion of galvanized steel by a freshwater strain of sulphate reducing bacteria (*Desulfovibrio* sp.), Corrosion Science, Vol. 49, No. 3, 2007, pp. 1097-1109.
- [50] D. Enning, J. Garrelfs, Corrosion of Iron by Sulfate-Reducing Bacteria: New Views of an Old Problem, Applied and Environmental Microbiology, Vol. 80, No. 4, 2014, pp. 1226-1236.

- [51] D. Enning, H. Venzlaff, J. Garrelfs, H.T. Dinh, V. Meyer, K. Mayrhofer, A.W. Hassel, M. Stratmann, F. Widdel, Marine sulfate-reducing bacteria cause serious corrosion of iron under electroconductive biogenic mineral crust, *Environmental Microbiology*, Vol. 14, No. 7, 2012, pp. 1772-1787.
- [52] H. Öster, Suomea piinaa maailman viheliäisin maalaji, joka syö betonia ja tappaa kalat, *Helsingin Sanomat*, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.7.2015): <http://www.hs.fi/tiede/a1436150608710>.
- [53] M. Leppänen, Teräspaalujen korroosio, diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Geotekniikan laitos, Tampere, 1992, 204 s. + liitteet 19 s.
- [54] T.G. Vinka, Korrosion på metaller i svenska jordar - sammanställning av resultat från fältexponeringar och praktiska erfarenheter, VA-Forsk 2003-34, Svenskt Vatten AB, Tukholma, Ruotsi, 2003, 132 p.
- [55] T.G. Vinka, Korrosion på kolstål, förzinkat stål och zink i jord – långtidsundersökning, 2014-18, Svenskt Vatten AB, Tukholma, Ruotsi, 2014, 40 p. Available: [http://www.svensktvatten.se/PageFiles/5579/SVU-rapport\\_2014-18.pdf](http://www.svensktvatten.se/PageFiles/5579/SVU-rapport_2014-18.pdf).
- [56] M. Norin, T.G. Vinka, Corrosion of carbon steel in filling material in an urban environment, *Materials and Corrosion*, Vol. 54, No. 9, 2003, pp. 641-651.
- [57] G. Camitz, Korrosion och korrosionsskydd av stålplåtar och stålspons i jord och vatten, rapport 93, Pålkommisionen - Commission on Pile Research, Linköping, Ruotsi, 1994, 115 p.
- [58] P.E. Bengtsson, U. Bergdahl, G. Camitz, T.G. Vinka, Statens Järnvägars undersökning av korrosion på stålplåtar i jord - Statistisk bearbetning, information 2002:1, Pålkommisionen - Commission on Pile Research, Linköping, Ruotsi, 2002, 68 p.
- [59] G. Camitz, U. Bergdahl, T.G. Vinka, Stålplåtars beständighet mot korrosion i jord - En sammanställning av kunskaper och erfarenheter, rapport 105, Pålkommisionen - Commission on Pile Research, Linköping, Ruotsi, 2009, 94 p.
- [60] U. Bergdahl, E. Tränk, Korrosionsskyddande beläggningar på stålplåtar i jord - Provning av reptålighet, Varia 533, Statens geotekniska institut (SGI) - Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Ruotsi, 2005, 111 p.
- [61] Hot-rolled Steel Plates, Sheets and Coils - Standard steel grades, comparison, designations and codes, Ruukki Metals Oy, MFI.001EN/09.2011/AN, 2011, 6 p. Available: <http://www.ruukki.ru/~media/Files/Steel-products/Hot-rolled-standard-steels/Ruukki-Hot-rolled-steels-Standard-steel-grades-comparison-designation-and-codes1.pdf>.
- [62] About NIST, National Institute of Standards and Technology, web page. Available (accessed 25.11.2015): [http://www.nist.gov/public\\_affairs/nandyou.cfm](http://www.nist.gov/public_affairs/nandyou.cfm).
- [63] W.J. Schwerdtfeger, Soil Resistivity as Related to Underground Corrosion and Cathodic Protection, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 69C, No. 1, 1965, pp. 71-77.

- [64] M. Romanoff, Underground corrosion, NBS, Washington DC, USA, 1957, 227 p.
- [65] W.J. Schwerdtfeger, M. Romanoff, NBS Papers on Underground Corrosion of Steel Piling 1962-1971 : Corrosion of Steel Pilings in Soils, Corrosion Evaluation of Steel Test Piles Exposed to Permafrost Soils, Performance of Steel Pilings in Soils, Polarization Measurements as Related to Corrosion of Underground Steel Piling, National Bureau of Standards Monograph 127, U.S Department of Commerce - National Bureau of Standards, Washington D.C., Yhdysvallat, 1972, 63 p.
- [66] W.J. Schwerdtfeger, M. Romanoff, Corrosion Rates on Underground Steel Test Piles at Turcot Yard, Montreal, Canada - Part 1, National Bureau of Standards Monograph 128, U.S Department of Commerce - National Bureau of Standards, Washington D.C., Yhdysvallat, 1972, 17 p.
- [67] R.E. Ricker, Analysis of Pipeline Steel Corrosion Data From NBS (NIST) Studies Conducted Between 1922-1940 and Relevance to Pipeline Management, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 115, No. 5, 2010, pp. 373-392.
- [68] Eurokoodit EN-standardit 2014 - Rakentamismääräyksistä eurokoodeihin, Suomen standardisoimisliitto SFS ry, 8 p. Saatavissa: [http://www.sfs.fi/files/309/SFSEuro-Kesite27062014\\_\(2\)1.9.2014.pdf](http://www.sfs.fi/files/309/SFSEuro-Kesite27062014_(2)1.9.2014.pdf).
- [69] SFS-EN 1993-5 + AC, Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 5: Paalut, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2007, 89 s.
- [70] B. Skrifvars, M. Hupa, 10 Tuhka, kuonaantuminen, likaantuminen ja korroosio, sisältä: R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa, I. Kurki-Suonio (toim.), Poltto ja palaminen, 2. p., Teknillisten tieteiden akatemia, Helsinki, 2002, s. 269-299.
- [71] E. Alakangas, Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, VTT Tiedotteita 2045, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 2000, 172 s. + liitteet 17 s. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/t2045.pdf>.
- [72] A. Pajukallio, M. Wahlström, E. Alasaarela, Maarakentamisen uusiomateriaalit - Ympäristökelpoisuuden osoittaminen ja tuotteistaminen, Ympäristöministeriön raportteja Ympäristöministeriö, Helsinki, 2011, 93 s. + liitteet 10 s. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B13DE6161-BF77-4AC5-98E3-7C73F9380A2C%7D/32052>.
- [73] Tuhkan käyttö lannoitteena, Elintarviketurvallisuusvirasto Evira, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 9.11.2015): <http://www.evira.fi/portal/fi/kasvit/viljely+ja+tuotanto/lannoitevalmisteet/tuhkan+kaytto+lannoitteena>.
- [74] Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 591/2006, 2006. Saatavissa: <https://www.edilex.fi/lainsaadanto/20060591>.
- [75] Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista 214/2007, 2007. Saatavissa: <https://www.edilex.fi/smur/20070214>.

- [76] H. Dahlbo, Jätteen luokittelu ongelmajätteeksi : arvioinnin perusteet ja menetelmät, Suomen ympäristökeskus, Helsinki, 2002, 160 s.
- [77] J. Havukainen, A. Hämäläinen, A. Sulamäki, Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttömahdollisuuksista maanrakentamisessa, Geoteknisen osaston tiedote 25, Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, geotekninen osasto, Helsinki, 1982, 19 s.
- [78] R. Jääskeläinen, Pohjarakennuksen perusteet, 3. p. Tammertekniikka, Tampere, 2012, 233 s.
- [79] Lyötävät RR-pienpaalut, Ruukki Construction, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.10.2015): <http://www.ruukki.fi/Teras/Infrastruktuuriratkaisut/Teraspaalut/Lyotavat-RR-pienpaalut>.
- [80] SSAB:n teräspaalut - Suunnittelu- ja asennusohjeet, SSAB, 52 s. Saatavissa: <http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Infra/Teraspaalut%20esitteet%20ja%20ohjeet/Tekninen%20ohje%20-%20EUROCODE%20-%20SSAB%20ter%C3%A4spaalut%20-%20Suunnittelu-%20ja%20asennusohjeet.pdf>.
- [81] SFS-EN 10219-2, Kylmämuovautut hitsatut seostamattomista teräksistä ja hienoraeteräksistä valmistetut rakenneputket. Osa 2: Toleranssit, mitat ja poikkileikesuureet, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2006, 66 s.
- [82] SFS-EN 10025-2, Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 2: Seostamattomat rakenneteräkset. Tekniset toimitusehdot, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2004, 66 s.
- [83] SFS-EN 10025-3, Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 3: Normalisoidut ja normalisointivalssatut hitsattavat hienoraerakenneteräkset. Tekniset toimitusehdot, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2004, 46 s.
- [84] SFS-EN 10025-4, Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 4: Termomekaanisesti valssatut hitsattavat hienoraeteräkset. Tekniset toimitusehdot, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2005, 46 s.
- [85] SFS-EN 10025-5, Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 5: Ilmastokorroosiota kestävät rakenneteräkset. Tekniset toimitusehdot, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2005, 46 s.
- [86] SFS-EN 10020, Teräslajien määritelmät ja luokittelu, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2001, 16 s.
- [87] T. Harju, 12.1 Sinkki ja sinkkipinnoitteet, sisältyy: P.J. Tunturi (toim.), Korroosio-käsikirja, 3. p., Kunnossapitoyhdistys ry, Helsinki, 2006, s. 594-605.
- [88] K.R. Trethewey, J. Chamberlain, Corrosion for Science and Engineering, 2nd ed. Longman, Harlow, United Kingdom, 1995, 480 p.



- [89] SFS-EN ISO 14713-3:en, Zinc coatings. Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel in structures. Part 3: Sherardizing, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2010, 22 p.
- [90] J. Kinnunen, Teräsrakenteiden suunnittelu, 4. uus. p., Rakennustieto, Helsinki, 2001, 180 s.
- [91] Ympäristöseloste: Kuumasinkityt rakennustuotteet, Rautaruukki Oyj, CFI.001FI/10.2011/AN, 2011, 6 s. Saatavissa: <http://www1.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Ymparistoselosteet/Ruukki-Kuumasinkityt-ter%C3%A4ksiset-rakennustuotteet.pdf>.
- [92] A. Lankinen, O. Lyytinen, Teräsohutlevyjen sinkityslinjat ja sinkkipinnoitteet, Kuumasinkitys, No. 1, 2007, s. 30-32.
- [93] H. Alén, 14.1 Maalit ja korroosionestomaalaus, sisältyy: P.J. Tunturi (toim.), Korroosiokäsikirja, 3. p., Kunnossapitoyhdistys ry, Helsinki, 2006, s. 676-709.
- [94] H. Alén, P.Å Biström, K. Syvänen, 9.3 Korroosionestomaalaus, sisältyy: J. Kouhi (toim.), Teräsrakenteen korroosionesto, Teräsrakenneyhdistys, Helsinki, 1980.
- [95] SFS 5873, Metallirakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. Käyttösuositus prosessi- ja metalliteollisuudelle., Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2008, 22 s.
- [96] SFS-EN ISO 8501-1, Teräspintojen esikäsittely ennen pinnoitusta maalilla tai vastaavilla tuotteilla. Pinnan puhtauden arviointi silmämääräisesti. Osa 1: Teräspintojen ruostumisasteet ja esikäsittelyasteet. Maalaamattomat teräspinnat ja aiemmista maaleista kauttaaltaan puhdistetut teräspinnat, Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2007, 24 s.
- [97] ISO 8501-1:1988, Preparation of steel substrates before application of paints and related products : visual assessment of surface cleanliness : international standard. Part 1, Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings, 3. ed. Standardiseringskommissionen i Sverige, Stockholm, Sweden, 1988, 120 p.
- [98] Teräsrakenteet: pintakäsittely - Yleiset laatuvaatimukset, Liikennevirasto, Taitorakenneyksikkö, TIEH 2230095 - SILKO 1.351, 3/2015, 70 s. + liitteet 19 s. Saatavissa: <http://www2.liikennevirasto.fi/sillat/silko/kansio1/s1351.pdf>.
- [99] Material safety data sheet - Cooper Black 760, Coopers Creek Chemical Corporation, West Conshohocken, USA, 2/19/2003, 5 p. Available: <http://www.wohlcoatings.com/files/50826048.pdf>.
- [100] Material safety data sheet - Cooper Black No. 775 Epoxy (A), Coopers Creek Chemical Corporation, West Conshohocken, USA, 2/19/2003, 5 p. Available: <http://www.wohlcoatings.com/files/50826110.pdf>.
- [101] Coal-tar pitch, IARC Monographs, Vol. 100F, 2012, pp. 161-166.

[102] Safety data sheet - ARC 858 (Part A), A.W. Chesterton Company, Groveland, USA, SDS No. 235A-12, 21 June 2013, 7 p. Available: [http://arcindustrialcoatings.chesterton.com/ArcDocuments/as858A\\_5A\\_EN.pdf](http://arcindustrialcoatings.chesterton.com/ArcDocuments/as858A_5A_EN.pdf).

[103] Safety data sheet - ARC 858 (Part B), A.W. Chesterton Company, Groveland, USA, SDS No. 235B-17, 11 December 2015, 8 p. Available: [http://arcindustrialcoatings.chesterton.com/ArcDocuments/as858B\\_EN.pdf](http://arcindustrialcoatings.chesterton.com/ArcDocuments/as858B_EN.pdf).

[104] Safety data sheet - ARC S2 (Part A) (GN and GY), A.W. Chesterton Company, Groveland, USA, SDS No. 269A-16, 3 April 2014, 8 p. Available: [http://arcindustrialcoatings.chesterton.com/ArcDocuments/asS2B\\_EN.pdf](http://arcindustrialcoatings.chesterton.com/ArcDocuments/asS2B_EN.pdf).

[105] Safety data sheet - ARC S2 (Part B) (GN, GY), A.W. Chesterton Company, Groveland, USA, SDS No. 269B-18, 3 April 2014, 8 p. Available: [http://arcindustrialcoatings.chesterton.com/ArcDocuments/asS2B\\_EN.pdf](http://arcindustrialcoatings.chesterton.com/ArcDocuments/asS2B_EN.pdf).

[106] Application instructions: ARC 858, A.W. Chesterton Company, Groveland, USA, 1 p. Available: [http://arcindustrialcoatings.chesterton.com/ArcDocuments/AI\\_858\\_EN.pdf](http://arcindustrialcoatings.chesterton.com/ArcDocuments/AI_858_EN.pdf).

[107] Application instructions: ARC S2, A.W. Chesterton Company, Groveland, USA, 1 p. Available: [http://arcindustrialcoatings.chesterton.com/ArcDocuments/AI\\_S2\\_EN.pdf](http://arcindustrialcoatings.chesterton.com/ArcDocuments/AI_S2_EN.pdf).

[108] SFS-EN 10289, Steel tubes and fittings for onshore and offshore pipelines. External liquid applied epoxy and epoxy-modified coatings, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2003, 42 p.

[109] SFS-EN ISO 21809-1, Petroleum and natural gas industries. External coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems. Part 1: Polyolefin coatings (3-layer PE and 3-layer PP), Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2011, 58 p.

[110] P. Siitonen, 19.4 Korroosiotutkimusmenetelmät laboratorio-olosuhteissa, sisältyy: P.J. Tunturi (toim.), Korroosiokäsikirja, 3. p., Kunnossapitoyhdistys ry, Helsinki, 2006, s. 842-858.

[111] T. Korpinen, 19.3 Korroosionopeuden mittausmenetelmät, sisältyy: P.J. Tunturi (toim.), Korroosiokäsikirja, 3. p., Kunnossapitoyhdistys ry, Helsinki, 2006, s. 838-841.

[112] B. Phull, Evaluating Uniform Corrosion, in: ASM Handbook, Vol. 13A, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, ASM International, Ohio, USA, 2003, pp. 542-544.

[113] SFS-EN ISO 4287:en, Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2000, 33 p.

- [114] D. Whitehouse, 3 - Profile and areal (3D) parameter characterization, in: D. Whitehouse (ed.), *Surfaces and Their Measurement*, Kogan Page Science, Oxford, United Kingdom, 2002, pp. 48-95.
- [115] P. Siitonen, 4 Korroosioprosessien kinetiikka, sisältyy: P.J. Tunturi (toim.), *Korroosiokäsikirja*, 3. p., Kunnossapitoyhdistys ry, Helsinki, 2006, s. 62-89.
- [116] SFS-EN ISO 17475, Corrosion of metals and alloys. Electrochemical test methods. Guidelines for conducting potentiostatic and potentiodynamic polarization measurements, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2008, 19 p.
- [117] Z. Ahmad, Chapter 3 - Corrosion Kinetics, in: *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom, 2006, pp. 57-119.
- [118] Sörnäistenrannan ja Hermanninrannan osayleiskaavaehdotus. Kaavan toteuttamisen teknistaloudellisten ja ympäristöterveydellisten vaikutusten arviointi, Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Helsinki, 2007, 40 s. Saatavissa: <http://www.hel.fi/hel2/ksv/hela/Kaupunkisuunnittelulautakunta/Esityslistat/liitteet/070100199.pdf>.
- [119] Ympäristötekniinen tutkimusraportti: Kyläsaari-Hermanninranta - Maaperän täydentävät haitta-ainetutkimukset, ENV636, Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto, Helsinki, 2015, 60 s.
- [120] Helsingin kaupungin karttapalvelu, Helsingin kaupunki, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 25.1.2016): <http://kartta.hel.fi/>.
- [121] SFS-EN 12457-3, Jätteiden karakterisointi. Liukoisuus. Rakeisten jättemateriaalien ja lietteiden liukoisuuden laadunvalvontatesti. Osa 3: Kaksivaiheinen ravistelutesti uuttoliuoksen ja kiinteän jätteen suhteessa 2 l/kg ja 8 l/kg materiaaleille, joiden kiintoaineksen osuus on suuri ja raekoko alle 4 mm (raekoon pienentäminen tarvittaessa), Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2012, 53 s.
- [122] R. Jääskeläinen, *Geotekniikan perusteet*, 3. p. Tammertekniikka, Tampere, 2011, 387 s.
- [123] HandySCAN 3D™ - the truly portable metrology-grade 3D scanners, Creaform Inc., 7 p. Available: [http://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/brochures/files/handyscan3d\\_brochure\\_en\\_hq\\_20082015.pdf](http://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/brochures/files/handyscan3d_brochure_en_hq_20082015.pdf).
- [124] Temaline NL -tuoteseloste, Tikkurila Oyj, Ref. no TCF 0002, 10.6.2013, 2 s. Saatavissa: [http://www.temaspeed.com/files/9671/TemalineNL\\_pds\\_fin.pdf](http://www.temaspeed.com/files/9671/TemalineNL_pds_fin.pdf).
- [125] Epoksiyhdistelmät TE4 - Temaline NL, Tikkurila Oyj, huhtikuu 2011, 2 s. Saatavissa: <http://www.tikkurila.fi/files/2941/TE4.pdf>.
- [126] SFS-ISO 19840, Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. Pinnoitteiden kuivakalvonpaksuuden mittausta ja hyväksymisperiaatteet karheilla pinnoilla, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2015, 41 s.

- [127] J. Laurila, Koepaalutus betonipaaluilla, Materiaaliopin laitos, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, julkaisematon raportti, 2015, 13 s.
- [128] Kalasataman pohjoiset alueet: Pohjaveden ja huokoskaasujen seuranta - Seuranta-raportti 2013, P17681P003/P004, Helsingin kaupunki, kaupunkisuunnitteluvirasto, kiinteistövirasto, Helsinki, 2014, 23 s. + liitteet 21 s.

## LIITE 1: SIDEAINEEN MUKAAN NIMETYT MAALITYYPIT RYHMITETTYINÄ KUIVUMISTAVAN JA LIUOTTEEN PERUSTEELLA

Kuivuminen	Liuoteohenteiset	Vesiohenteiset	Liuotteettomat
<b>1. Fysikaalinen</b> (liuotteettomille uunikuivaus) Liuote tai vesi haihtuu.	kloorikautsu syklokautsu vinyyli bitumi vaha	akryylilateksi bitumiemulsio	PVC-plastisolit kestopuovijauheet
<b>2. Kemiallinen</b> 2.1 1-komponenttiset - hapettumalla kuivuvat (reagoivat ilman hapen kanssa)  - kosteuskovettuvat (reagoivat ilman kosteuden kanssa)  - lämmössä kovettuvat (polttomaalit)	öljy alkydi epoksiesteri uretaaniöljy  polyuretaani  alkydi-amino akryyli-amino silikonipolyesteri	alkydidispersio alkydi-lateksi    akryyli-amino alkydi-amino	öljy    epoksi, akryyli- ja polyesterijauhe- maalit
2.2 2-komponenttiset - muoviosa + kovete  - maali + katalyytti     - jauhe + neste	epoksi epoksiterva polyuretaani  wash primer alkydi-amino (happokovettuva)  etysilikaatti (sinkki-)	epoksi (vesiohenteiset)  akryyli/katalyytti  alkalisilikaatti (sinkki)	epoksi- ja polyuretaanipinnoitteet  akryyli/peroksidi polyesteri/peroksidi thiokolkitit  polyesterikitit

# LIITE 2: MAAPERÄ- JA VESINÄYTEANALYYSITULOKSET



1(24)

TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

Näytetunnus		15MN 5793	15MN 5794	15MN 5796	15MN 5797	15MN 5806	
Näytteen nimi		PL1/0-0,5	PL1/0,5-1	PL1/1-1,5	PL1/1,5-2	PL1/2-2,5	
Näytteen saapumispäivä		13.11.2015	13.11.2015	13.11.2015	13.11.2015	13.11.2015	
Näytteen aloituspäivä		27.11.2015	27.11.2015	20.11.2015	23.11.2015	23.11.2015	
Näytteen valmistuspäivä		03.12.2015	03.12.2015	07.12.2015	03.12.2015	07.12.2015	
<b>Määrittelykset</b>							
Kuiva-aine	%	91,4	96,0	95,6	84,5	84,7	Novalab 010
Hekutushäviö kuiva-aineessa	%	4,80	3,60	4,90	6,80		Novalab 009
Kokonaishiili kuiva-aineessa	%	2,4	1,8	2,5	3,4		
pH				9,0			SFS 3012:1979 (Novalab 017)
Öljypitoisuus (>C10-C21)	mg/kg			370			ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus (>C21-<C40)	mg/kg			9800			ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus (>C10-<C40)	mg/kg			10000			ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus summa (>C5-<C40)	mg/kg			10000			ISO 16703:2004, mod.
>C5-C10	mg/kg			< 30			Novalab 049
MTBE	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
TAME	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Bentseeni	mg/kg			0,02			Novalab 049
Tolueeni	mg/kg			0,02			Novalab 049
Ksyleeni	mg/kg			0,01			Novalab 049
Etyylibentseeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,2-dikloorietaani	mg/kg						Novalab 049
1,2-dibromietaani	mg/kg						Novalab 049
1,1,2-trikloorietaani	mg/kg						Novalab 049
1,1-dikloorieteeni	mg/kg						Novalab 049

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyäessä.

Toimisto ja laboratorio  
Lepolantie 9  
FI-03600 Karkkila  
Finland

puh (09) 2252 860  
www.novalab.fi

Pankki  
Länsi-Uudenmaan Op  
Karkkila  
FI43 5297 2820 0007 16

Y-tunnus 0733227-8  
Kotipaikka Karkkila  
Alv.rek.



## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

		15MN 5793 PL1/0-0,5	15MN 5794 PL1/0,5-1	15MN 5796 PL1/1-1,5	15MN 5797 PL1/1,5-2	15MN 5806 PL1/2-2,5	
1,2-diklooripropaani	mg/kg						Novalab 049
2,2-diklooripropaani	mg/kg						Novalab 049
1,4-diklooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,1-dikloorietaani	mg/kg						Novalab 049
Dikloorimetaani	mg/kg						Novalab 040
Trikloorieteeni	mg/kg						Novalab 049
Klooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
Bromoformi	mg/kg						Novalab 049
Hiilitetrakloridi	mg/kg						Novalab 049
1,2,3-triklooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,2,4-triklooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,1,1-trikloorietaani	mg/kg						Novalab 049
Isopropylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,3,5-trimetylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
Sec-butylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,2,4-trimetylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
n-butylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
p-isopropyylitolueeni	mg/kg						Novalab 049
Bromobentseeni	mg/kg						Novalab 049
Bromodikloorimetaani	mg/kg						Novalab 049
Tert-butylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,2-dibromo-3-klooripropaani	mg/kg						Novalab 049
1,2-diklooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,3-diklooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
Trans-1,3-diklooripropeeni	mg/kg						Novalab 049
N-propylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
Styreeni	mg/kg						Novalab 049
1,1,1,2-tetrakloorietaani	mg/kg						Novalab 049
Trans-1,2-dikloorieteeni	mg/kg						Novalab 049
Cis-1,2-dikloorieteeni	mg/kg						Novalab 049
1,1-diklooripropeeni	mg/kg						Novalab 049
Cis-1,3-diklooripropeeni	mg/kg						Novalab 049
Tetrakloorieteeni	mg/kg						Novalab 049
Dibromidikloorimetaani	mg/kg						Novalab 049
Naftaleeni	mg/kg						Novalab 049

\* Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyäessä.



## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

		15MN 5793	15MN 5794	15MN 5796	15MN 5797	15MN 5806	
		PL1/0-0,5	PL1/0,5-1	PL1/1-1,5	PL1/1,5-2	PL1/2-2,5	
Heksaklooributadieeni	mg/kg						Novalab 049
1,3-diklooripropaani	mg/kg						Novalab 049
Trikloorifluorimetaani	mg/kg						Novalab 049
Kloroformi	mg/kg						Novalab 049
1,1,2,2-tetrakloorietaani	mg/kg						Novalab 049
4-klooritolueeni	mg/kg						Novalab 049
2-klooritolueeni	mg/kg						Novalab 049
Vinyylidikloridi	mg/kg						Novalab 049
Naftaleeni	mg/kg			0,24		0,23	Novalab 050*
Asenaftyleeni	mg/kg			< 0,05		< 0,05	Novalab 050
Asenaftteeni	mg/kg			< 0,05		< 0,05	Novalab 050*
Fluoreeni	mg/kg			0,58		< 0,05	Novalab 050*
Fenantreeni	mg/kg			0,82		0,32	Novalab 050*
Antraseeni	mg/kg			0,17		0,05	Novalab 050*
Fluoranteeni	mg/kg			1,0		0,35	Novalab 050*
Pyreeni	mg/kg			0,88		0,31	Novalab 050*
Bentso(a)antraseeni	mg/kg			0,39		0,10	Novalab 050*
Kryseeni	mg/kg			0,59		0,18	Novalab 050*
Bentso(b)fluoranteeni	mg/kg			0,84		0,23	Novalab 050*
Bentso(k)fluoranteeni	mg/kg			0,29		0,06	Novalab 050*
Bentso(a)pyreeni	mg/kg			0,58		0,11	Novalab 050*
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	mg/kg			0,59		0,08	Novalab 050*
Dibentso(a,h)antraseeni	mg/kg			0,06		< 0,05	Novalab 050*
Bentso(g,h,i)peryleeni	mg/kg			0,43		0,09	Novalab 050*
PAH-yhdisteiden summa	mg/kg			7,0		2,2	Novalab 050*
PCB-28	mg/kg			< 0,002			Novalab 051
PCB-52	mg/kg			0,011			Novalab 051
PCB-101	mg/kg			0,003			Novalab 051
PCB-118	mg/kg			< 0,002			Novalab 051
PCB-138	mg/kg			0,005			Novalab 051
PCB-153	mg/kg			0,013			Novalab 051
PCB-180	mg/kg			0,008			Novalab 051
PCB-yhdisteiden summa	mg/kg			< 0,05			Novalab 051
Kalium (K)	g/kg	2,2	2,8	1,4	1,9		Novalab 067
Magnesium (Mg)	g/kg	3,5	4,2	2,8	3,0		Novalab 067

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.



**TUTKIMUSTODISTUS**

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

		15MN 5793 PL1/0-0,5	15MN 5794 PL1/0,5-1	15MN 5796 PL1/1-1,5	15MN 5797 PL1/1,5-2	15MN 5806 PL1/2-2,5	
Natrium (Na)	g/kg	0,36	0,27	0,26	1,4		Novalab 067
Rikki (S)	g/kg	0,58	0,74	0,45	2,4		Novalab 067
Arseeni (As)	mg/kg	3,9	4,2	3,1	22	19	Novalab 068*
Kadmium (Cd)	mg/kg	< 0,50	< 0,50	< 0,50	3,6	6,7	Novalab 068*
Koboltti (Co)	mg/kg	4,4	3,3	3,0	10	12	Novalab 068*
Kromi (Cr)	mg/kg	25	43	17	52	94	Novalab 068*
Kupari (Cu)	mg/kg	30	17	60	560	1200	Novalab 068*
Elohopea (Hg)	mg/kg	< 0,50	< 0,50	< 0,50	1,8	< 0,50	Novalab 068*
Nikkeli (Ni)	mg/kg	11	7,1	10,0	110	54	Novalab 068*
Lyijy (Pb)	mg/kg	19	15	71	2400	730	Novalab 068*
Antimoni (Sb)	mg/kg	0,95	1,1	1,6	140	27	Novalab 068*
Vanadiini (V)	mg/kg	22	20	18	20	37	Novalab 068*
Sinkki (Zn)	mg/kg	130	47	120	1800	6700	Novalab 068*
Kloridi (Cl-) tulokosteassa	mg/kg	21	63	6,8	23		SFS-EN 13652, Nova- lab 020
Syanidi, kokonais (CNkok) kuiva-aineessa	mg/kg			1,1			SFS 5747:1992, mod.

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analysien mittausepävarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.



## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015

FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 HelsinkiTilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

Näytetunnus		15MN 5807	15MN 5808	15MN 5809	15MN 5810	15MN 5811	
Näytteen nimi		PL1/2,5-3	PL1/4-4,5	PL1/5,5-6	PL1/6-6,5	PL1/6,5-7	
Näytteen saapumispäivä		13.11.2015	13.11.2015	13.11.2015	13.11.2015	13.11.2015	
Näytteen aloituspäivä		23.11.2015	20.11.2015	27.11.2015	23.11.2015	23.11.2015	
Näytteen valmistuspäivä		07.12.2015	07.12.2015	07.12.2015	03.12.2015	26.11.2015	
<b>Määritykset</b>							
Kuiva-aine	%	72,6	82,1	66,0	57,3	59,9	Novalab 010
Hekutushäviö kuiva-aineessa	%				4,60		Novalab 009
Kokonaishiili kuiva-aineessa	%				2,3		
pH			8,2				SFS 3012:1979 (Novalab 017)
Öljypitoisuus (>C10-C21)	mg/kg	500	110	1800			ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus (>C21-<C40)	mg/kg	1600	510	4200			ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus (>C10-<C40)	mg/kg	2100	620	6000			ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus summa (>C5-<C40)	mg/kg	2100	630	6100			ISO 16703:2004, mod.
>C5-C10	mg/kg	< 30	< 30	61			Novalab 049
MTBE	mg/kg	< 0,01	< 0,01	< 0,01			Novalab 049
TAME	mg/kg	< 0,01	< 0,01	< 0,01			Novalab 049
Bentseeni	mg/kg	< 0,01	0,03	0,03			Novalab 049
Tolueeni	mg/kg	< 0,01	0,02	0,11			Novalab 049
Ksyleeni	mg/kg	< 0,01	< 0,01	1,0			Novalab 049
Etyylibentseeni	mg/kg	< 0,01	< 0,01	0,09			Novalab 049
1,2-dikloorietaani	mg/kg						Novalab 049
1,2-dibromietaani	mg/kg						Novalab 049
1,1,2-trikloorietaani	mg/kg						Novalab 049
1,1-dikloorieteeni	mg/kg						Novalab 049

\* Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauservarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.



## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

		15MN 5807 PL1/2,5-3	15MN 5808 PL1/4-4,5	15MN 5809 PL1/5,5-6	15MN 5810 PL1/6-6,5	15MN 5811 PL1/6,5-7	
1,2-diklooripropaani	mg/kg						Novalab 049
2,2-diklooripropaani	mg/kg						Novalab 049
1,4-diklooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,1-dikloorietaani	mg/kg						Novalab 049
Dikloorimetaani	mg/kg						Novalab 040
Trikloorieteeni	mg/kg						Novalab 049
Klooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
Bromoformi	mg/kg						Novalab 049
Hiilitetrakloridi	mg/kg						Novalab 049
1,2,3-triklooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,2,4-triklooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,1,1-trikloorietaani	mg/kg						Novalab 049
Isopropyylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,3,5-trimetyylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
Sec-butyylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,2,4-trimetyylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
n-butyylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
p-isopropyylitolueeni	mg/kg						Novalab 049
Bromobentseeni	mg/kg						Novalab 049
Bromodikloorimetaani	mg/kg						Novalab 049
Tert-butyylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,2-dibromo-3-klooripropaani	mg/kg						Novalab 049
1,2-diklooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,3-diklooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
Trans-1,3-diklooripropeeni	mg/kg						Novalab 049
N-propyylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
Styreeni	mg/kg						Novalab 049
1,1,1,2-tetrakloorietaani	mg/kg						Novalab 049
Trans-1,2-dikloorieteeni	mg/kg						Novalab 049
Cis-1,2-dikloorieteeni	mg/kg						Novalab 049
1,1-diklooripropeeni	mg/kg						Novalab 049
Cis-1,3-diklooripropeeni	mg/kg						Novalab 049
Tetrakloorieteeni	mg/kg						Novalab 049
Dibromidikloorimetaani	mg/kg						Novalab 049
Naftaleeni	mg/kg						Novalab 049

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.



## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

		15MN 5807 PL1/2,5-3	15MN 5808 PL1/4-4,5	15MN 5809 PL1/5,5-6	15MN 5810 PL1/6-6,5	15MN 5811 PL1/6,5-7	
Heksaklooributadieeni	mg/kg						Novalab 049
1,3-diklooripropaani	mg/kg						Novalab 049
Trikloorifluorimetaani	mg/kg						Novalab 049
Kloroformi	mg/kg						Novalab 049
1,1,2,2-tetrakloorietaani	mg/kg						Novalab 049
4-klooritolueeni	mg/kg						Novalab 049
2-klooritolueeni	mg/kg						Novalab 049
Vinyylikloridi	mg/kg						Novalab 049
Naftaleeni	mg/kg	14	1,9	78			Novalab 050*
Asenaftyleeni	mg/kg	0,80	< 0,05	7,7			Novalab 050
Asenaftteeni	mg/kg	0,30	< 0,05	0,81			Novalab 050*
Fluoreeni	mg/kg	0,93	0,07	4,1			Novalab 050*
Fenantreeni	mg/kg	1,3	0,18	5,1			Novalab 050*
Antraseeni	mg/kg	0,20	< 0,05	0,94			Novalab 050*
Fluoranteeni	mg/kg	0,48	0,20	2,0			Novalab 050*
Pyreeni	mg/kg	0,39	0,21	1,5			Novalab 050*
Bentso(a)antraseeni	mg/kg	0,08	0,07	0,33			Novalab 050*
Kryseeni	mg/kg	0,11	0,11	0,44			Novalab 050*
Bentso(b)fluoranteeni	mg/kg	0,10	0,11	0,35			Novalab 050*
Bentso(k)fluoranteeni	mg/kg	< 0,05	< 0,05	0,13			Novalab 050*
Bentso(a)pyreeni	mg/kg	0,06	0,06	0,20			Novalab 050*
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	mg/kg	< 0,05	< 0,05	0,44			Novalab 050*
Dibentso(a,h)antraseeni	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05			Novalab 050*
Bentso(g,h,i)peryleeni	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05			Novalab 050*
PAH-yhdisteiden summa	mg/kg	19	3,2	100			Novalab 050*
PCB-28	mg/kg	< 0,002					Novalab 051
PCB-52	mg/kg	< 0,002					Novalab 051
PCB-101	mg/kg	< 0,002					Novalab 051
PCB-118	mg/kg	< 0,002					Novalab 051
PCB-138	mg/kg	< 0,002					Novalab 051
PCB-153	mg/kg	< 0,002					Novalab 051
PCB-180	mg/kg	< 0,002					Novalab 051
PCB-yhdisteiden summa	mg/kg	< 0,05					Novalab 051
Kalium (K)	g/kg				8,9		Novalab 067
Magnesium (Mg)	g/kg				9,8		Novalab 067

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittausepävarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.



## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015

FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 HelsinkiTilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

		15MN 5807 PL1/2,5-3	15MN 5808 PL1/4-4,5	15MN 5809 PL1/5,5-6	15MN 5810 PL1/6-6,5	15MN 5811 PL1/6,5-7	
Natrium (Na)	g/kg				3,7		Novalab 067
Rikki (S)	g/kg				11		Novalab 067
Arseeni (As)	mg/kg	23	50				Novalab 068*
Kadmium (Cd)	mg/kg	6,1	14				Novalab 068*
Koboltti (Co)	mg/kg	11	21				Novalab 068*
Kromi (Cr)	mg/kg	59	75				Novalab 068*
Kupari (Cu)	mg/kg	650	1100				Novalab 068*
Elohopea (Hg)	mg/kg	0,81	0,63				Novalab 068*
Nikkeli (Ni)	mg/kg	58	120				Novalab 068*
Lyijy (Pb)	mg/kg	870	750				Novalab 068*
Antimoni (Sb)	mg/kg	30	28				Novalab 068*
Vanadiini (V)	mg/kg	40	17				Novalab 068*
Sinkki (Zn)	mg/kg	1800	4300				Novalab 068*
Kloridi (Cl-) tulokosteassa	mg/kg				1200		SFS-EN 13652, Nova- lab 020
Syanidi, kokonais (CNkok) kuiva-aineessa	mg/kg		0,6				SFS 5747:1992, mod.

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittausepävarmuudet ovat saatavilla pyydettyäessä.

**TUTKIMUSTODISTUS**Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015

FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 HelsinkiTilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

Näytetunnus		15MN 5812	15MN 5813	15MN 5814	15MN 5815	15MN 5816	
Näytteen nimi		PL1/7,5-8	PL1/8,5-9	PL1/10,5-11	PL2/0,5-1	PL2/1-1,5	
Näytteen saapumispäivä		13.11.2015	13.11.2015	13.11.2015	13.11.2015	13.11.2015	
Näytteen aloituspäivä		23.11.2015	23.11.2015	23.11.2015	24.11.2015	20.11.2015	
Näytteen valmistuspäivä		30.11.2015		30.11.2015	07.12.2015	07.12.2015	
<b>Määrittelykset</b>							
Kuiva-aine	%	52,2	51,5	61,3	88,5	84,0	Novalab 010
Hekutushäviö kuiva-aineessa	%				2,90	6,80	Novalab 009
Kokonaishiili kuiva-aineessa	%				1,5	3,4	
pH						7.1	SFS 3012:1979 (Novalab 017)
Öljypitoisuus (>C10-C21)	mg/kg					83	ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus (>C21-<C40)	mg/kg					2500	ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus (>C10-<C40)	mg/kg					2600	ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus summa (>C5-<C40)	mg/kg						ISO 16703:2004, mod.
>C5-C10	mg/kg						Novalab 049
MTBE	mg/kg						Novalab 049
TAME	mg/kg						Novalab 049
Bentseeni	mg/kg		< 0,01				Novalab 049
Tolueeni	mg/kg		< 0,01				Novalab 049
Ksyleeni	mg/kg		< 0,01				Novalab 049
Etyylibentseeni	mg/kg		< 0,01				Novalab 049
1,2-dikloorietaani	mg/kg		< 0,01				Novalab 049
1,2-dibromietaani	mg/kg		< 0,01				Novalab 049
1,1,2-trikloorietaani	mg/kg		< 0,01				Novalab 049
1,1-dikloorieteeni	mg/kg		< 0,01				Novalab 049

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyäessä.



## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

15MN 15MN 15MN 15MN 15MN  
5812 5813 5814 5815 5816  
PL1/7,5-8 PL1/8,5-9 PL1/10,5-- PL2/0,5-1 PL2/1-1,5  
11

1,2-diklooripropaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
2,2-diklooripropaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,4-diklooribentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,1-dikloorietaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Dikloorimetaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 040
Trikloorieteeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Klooribentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Bromoformi	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Hiilitetrakloridi	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,2,3-triklooribentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,2,4-triklooribentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,1,1-trikloorietaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Isopropylibentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,3,5-trimetylibentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Sec-butylibentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,2,4-trimetylibentseen	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
n-butylibentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
p-isopropyylitolueeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Bromobentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Bromodikloorimetaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Tert-butylibentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,2-dibromo-3-klooripropaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,2-diklooribentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,3-diklooribentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Trans-1,3-diklooripropeeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
N-propylibentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Styreeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,1,1,2-tetrakloorietaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Trans-1,2-dikloorieteeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Cis-1,2-dikloorieteeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,1-diklooripropeeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Cis-1,3-diklooripropeeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Tetrakloorieteeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Dibromidikloorimetaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.

**TUTKIMUSTODISTUS**

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015


FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

15MN 15MN 15MN 15MN 15MN  
5812 5813 5814 5815 5816  
PL1/7,5-8 PL1/8,5-9 PL1/10,5-- PL2/0,5-1 PL2/1-1,5  
11

Naftaleeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Heksaklooributadieeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,3-diklooripropaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Trikloorifluorimetaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Kloroformi	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,1,2,2-tetrakloorietaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
4-klooritolueeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
2-klooritolueeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Vinyylidikloridi	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Naftaleeni	mg/kg			1,7	0,53	Novalab 050*
Asenaftyleeni	mg/kg			0,25	0,16	Novalab 050
Asenaftteeni	mg/kg			0,06	0,10	Novalab 050*
Fluoreeni	mg/kg			0,24	0,30	Novalab 050*
Fenantreeni	mg/kg			0,73	2,7	Novalab 050*
Antraseeni	mg/kg			0,14	0,38	Novalab 050*
Fluoranteeni	mg/kg			0,68	3,0	Novalab 050*
Pyreeni	mg/kg			0,56	2,3	Novalab 050*
Bentso(a)antraseeni	mg/kg			0,22	1,3	Novalab 050*
Kryseeni	mg/kg			0,26	1,3	Novalab 050*
Bentso(b)fluoranteeni	mg/kg			0,29	1,5	Novalab 050*
Bentso(k)fluoranteeni	mg/kg			0,09	0,43	Novalab 050*
Bentso(a)pyreeni	mg/kg			0,22	0,77	Novalab 050*
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	mg/kg			0,20	0,53	Novalab 050*
Dibentso(a,h)antraseeni	mg/kg			< 0,05	0,08	Novalab 050*
Bentso(g,h,i)peryleeni	mg/kg			0,16	0,62	Novalab 050*
PAH-yhdisteiden summa	mg/kg			5,8	16	Novalab 050*
PCB-28	mg/kg			< 0,002	0,012	Novalab 051
PCB-52	mg/kg			< 0,002	0,021	Novalab 051
PCB-101	mg/kg			0,007	0,23	Novalab 051
PCB-118	mg/kg			< 0,002	0,037	Novalab 051
PCB-138	mg/kg			0,009	0,57	Novalab 051
PCB-153	mg/kg			0,020	1,0	Novalab 051
PCB-180	mg/kg			0,014	1,0	Novalab 051
PCB-yhdisteiden summa	mg/kg			0,051	3,0	Novalab 051

\* Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyäessä.



**TUTKIMUSTODISTUS**

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

		15MN 5812	15MN 5813	15MN 5814	15MN 5815	15MN 5816	
		PL1/7,5-8	PL1/8,5-9	PL1/10,5-- 11	PL2/0,5-1	PL2/1-1,5	
Kalium (K)	g/kg				3,5	2,0	Novalab 067
Magnesium (Mg)	g/kg				4,2	3,5	Novalab 067
Natrium (Na)	g/kg				0,77	0,65	Novalab 067
Rikki (S)	g/kg				0,71	0,92	Novalab 067
Arseeni (As)	mg/kg				11	8,9	Novalab 068*
Kadmium (Cd)	mg/kg				1,6	1,6	Novalab 068*
Koboltti (Co)	mg/kg				6,1	8,7	Novalab 068*
Kromi (Cr)	mg/kg				39	42	Novalab 068*
Kupari (Cu)	mg/kg				210	230	Novalab 068*
Elohopea (Hg)	mg/kg				< 0,50	2,2	Novalab 068*
Nikkeli (Ni)	mg/kg				27	43	Novalab 068*
Lyijy (Pb)	mg/kg				660	420	Novalab 068*
Antimoni (Sb)	mg/kg				16	11	Novalab 068*
Vanadiini (V)	mg/kg				23	16	Novalab 068*
Sinkki (Zn)	mg/kg				450	840	Novalab 068*
Kloridi (Cl-) tulokosteassa	mg/kg				63	15	SFS-EN 13652, Nova- lab 020
Syanidi, kokonais (CNkok) kuiva-aineessa	mg/kg					6.7	SFS 5747:1992, mod.

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testaustalouden lupaa. Analyysien mittausepävarmuudet ovat saatavilla pyydettyä.



## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015

FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 HelsinkiTilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

Näytetunnus		15MN 5817	15MN 5818	15MN 5819	15MN 5820	15MN 5821	
Näytteen nimi		PL2/1,5-2	PL2/3-3,5	PL2/5-5,5	PL2/7-7,5	PL3/1,5-2	
Näytteen saapumispäivä		13.11.2015	13.11.2015	13.11.2015	13.11.2015	13.11.2015	
Näytteen aloituspäivä		24.11.2015	24.11.2015	25.11.2015	25.11.2015	27.11.2015	
Näytteen valmistuspäivä		07.12.2015	07.12.2015	07.12.2015	01.12.2015	01.12.2015	
<b>Määritykset</b>							
Kuiva-aine	%	85,3	63,3	58,2	45,9	84,4	Novalab 010
Hehkutushäviö kuiva-aineessa	%	13,0					Novalab 009
Kokonaishiili kuiva-aineessa	%	6,5					
pH							SFS 3012:1979 (Novalab 017)
Öljypitoisuus (>C10-C21)	mg/kg	170	900				ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus (>C21-<C40)	mg/kg	18000	3900				ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus (>C10-<C40)	mg/kg	18000	4800				ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus summa (>C5-<C40)	mg/kg	18000					ISO 16703:2004, mod.
>C5-C10	mg/kg	< 30					Novalab 049
MTBE	mg/kg	< 0,01					Novalab 049
TAME	mg/kg	< 0,01					Novalab 049
Bentseeni	mg/kg	< 0,01		< 0,01			Novalab 049
Tolueeni	mg/kg	< 0,01		< 0,01			Novalab 049
Ksyleeni	mg/kg	< 0,01		< 0,01			Novalab 049
Etyylibentseeni	mg/kg	< 0,01		< 0,01			Novalab 049
1,2-dikloorietaani	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,2-dibromietaani	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,1,2-trikloorietaani	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,1-dikloorieteeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049

\* Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyäessä.



## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

		15MN 5817 PL2/1,5-2	15MN 5818 PL2/3-3,5	15MN 5819 PL2/5-5,5	15MN 5820 PL2/7-7,5	15MN 5821 PL3/1,5-2	
1,2-diklooripropaani	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
2,2-diklooripropaani	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,4-diklooribentseeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,1-dikloorietaani	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Dikloorimetaani	mg/kg			< 0,01			Novalab 040
Trikloorieteeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Klooribentseeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Bromoformi	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Hiilitetrakloridi	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,2,3-triklooribentseeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,2,4-triklooribentseeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,1,1-trikloorietaani	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Isopropylibentseeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,3,5-trimetyylibentseeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Sec-butylibentseeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,2,4-trimetyylibentseeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
n-butylibentseeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
p-isopropyylitolueeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Bromobentseeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Bromodikloorimetaani	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Tert-butylibentseeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,2-dibromo-3-klooripropaani	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,2-diklooribentseeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,3-diklooribentseeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Trans-1,3-diklooripropeeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
N-propylibentseeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Styreeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,1,1,2-tetrakloorietaani	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Trans-1,2-dikloorieteeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Cis-1,2-dikloorieteeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,1-diklooripropeeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Cis-1,3-diklooripropeeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Tetrakloorieteeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Dibromodikloorimetaani	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Naftaleeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049

\* Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.



## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

		15MN 5817 PL2/1,5-2	15MN 5818 PL2/3-3,5	15MN 5819 PL2/5-5,5	15MN 5820 PL2/7-7,5	15MN 5821 PL3/1,5-2	
Heksaklooributadieeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,3-diklooripropaani	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Trikloorifluorimetaani	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Kloroformi	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
1,1,2,2-tetrakloorietaani	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
4-klooritolueeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
2-klooritolueeni	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Vinyylikloridi	mg/kg			< 0,01			Novalab 049
Naftaleeni	mg/kg	0,29	0,70				Novalab 050*
Asenaftyleeni	mg/kg	< 0,05	0,11				Novalab 050
Asenafteeni	mg/kg	< 0,05	0,30				Novalab 050*
Fluoreeni	mg/kg	< 0,05	0,62				Novalab 050*
Fenantreeni	mg/kg	0,19	4,9				Novalab 050*
Antraseeni	mg/kg	< 0,05	1,1				Novalab 050*
Fluoranteeni	mg/kg	0,13	4,3				Novalab 050*
Pyreeni	mg/kg	0,11	7,2				Novalab 050*
Bentso(a)antraseeni	mg/kg	< 0,05	1,9				Novalab 050*
Kryseeni	mg/kg	< 0,05	2,5				Novalab 050*
Bentso(b)fluoranteeni	mg/kg	< 0,05	2,2				Novalab 050*
Bentso(k)fluoranteeni	mg/kg	< 0,05	0,52				Novalab 050*
Bentso(a)pyreeni	mg/kg	< 0,05	2,1				Novalab 050*
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	mg/kg	< 0,05	1,1				Novalab 050*
Dibentso(a,h)antraseeni	mg/kg	< 0,05	0,16				Novalab 050*
Bentso(g,h,i)peryleeni	mg/kg	< 0,05	1,5				Novalab 050*
PAH-yhdisteiden summa	mg/kg	0,85	31				Novalab 050*
PCB-28	mg/kg	< 0,002					Novalab 051
PCB-52	mg/kg	< 0,002					Novalab 051
PCB-101	mg/kg	< 0,002					Novalab 051
PCB-118	mg/kg	< 0,002					Novalab 051
PCB-138	mg/kg	< 0,002					Novalab 051
PCB-153	mg/kg	< 0,002					Novalab 051
PCB-180	mg/kg	< 0,002					Novalab 051
PCB-yhdisteiden summa	mg/kg	< 0,05					Novalab 051
Kalium (K)	g/kg	2,4					Novalab 067
Magnesium (Mg)	g/kg	3,6					Novalab 067

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.



## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

		15MN 5817 PL2/1,5-2	15MN 5818 PL2/3-3,5	15MN 5819 PL2/5-5,5	15MN 5820 PL2/7-7,5	15MN 5821 PL3/1,5-2	
Natrium (Na)	g/kg	4,3					Novalab 067
Rikki (S)	g/kg	5,0					Novalab 067
Arseeni (As)	mg/kg	44					Novalab 068*
Kadmium (Cd)	mg/kg	7,7					Novalab 068*
Koboltti (Co)	mg/kg	21					Novalab 068*
Kromi (Cr)	mg/kg	82					Novalab 068*
Kupari (Cu)	mg/kg	2000					Novalab 068*
Elohopea (Hg)	mg/kg	1,1					Novalab 068*
Nikkeli (Ni)	mg/kg	240					Novalab 068*
Lyijy (Pb)	mg/kg	3800					Novalab 068*
Antimoni (Sb)	mg/kg	47					Novalab 068*
Vanadiini (V)	mg/kg	19					Novalab 068*
Sinkki (Zn)	mg/kg	5500					Novalab 068*
Kloridi (Cl-) tulokosteassa	mg/kg	32					SFS-EN 13652, Nova- lab 020
Syanidi, kokonais (CNkok) kuiva-aineessa	mg/kg						SFS 5747:1992, mod.

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittausepävarmuudet ovat saatavilla pyydettyäessä.



## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015

FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 HelsinkiTilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

Näytetunnus		15MN 5822	15MN 5823	15MN 5824	15MN 5825	15MN 5827	
Näytteen nimi		PL3/2-2,5	PL3/2,5-3	PL3/3-3,5	PL3/3,5-4	PL3/6-6,5	
Näytteen saapumispäivä		13.11.2015	13.11.2015	13.11.2015	13.11.2015	13.11.2015	
Näytteen aloituspäivä		27.11.2015	27.11.2015	27.11.2015	27.11.2015	27.11.2015	
Näytteen valmistuspäivä		02.12.2015	01.12.2015	02.12.2015	07.12.2015	01.12.2015	
<b>Määritykset</b>							
Kuiva-aine	%	75,4	85,3	70,9	87,0	55,1	Novalab 010
Hehkutushäviö kuiva-aineessa	%						Novalab 009
Kokonaishiili kuiva-aineessa	%						
pH							SFS 3012:1979 (Novalab 017)
Öljypitoisuus (>C10-C21)	mg/kg				< 50		ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus (>C21-<C40)	mg/kg				< 50		ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus (>C10-<C40)	mg/kg				< 50		ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus summa (>C5-<C40)	mg/kg						ISO 16703:2004, mod.
>C5-C10	mg/kg						Novalab 049
MTBE	mg/kg						Novalab 049
TAME	mg/kg						Novalab 049
Bentseeni	mg/kg						Novalab 049
Tolueeni	mg/kg						Novalab 049
Ksyleeni	mg/kg						Novalab 049
Etyylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,2-dikloorietaani	mg/kg						Novalab 049
1,2-dibromietaani	mg/kg						Novalab 049
1,1,2-trikloorietaani	mg/kg						Novalab 049
1,1-dikloorieteeni	mg/kg						Novalab 049

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.

**TUTKIMUSTODISTUS**

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

		15MN 5822 PL3/2-2,5	15MN 5823 PL3/2,5-3	15MN 5824 PL3/3-3,5	15MN 5825 PL3/3,5-4	15MN 5827 PL3/6-6,5	
1,2-diklooripropaani	mg/kg						Novalab 049
2,2-diklooripropaani	mg/kg						Novalab 049
1,4-diklooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,1-dikloorietaani	mg/kg						Novalab 049
Dikloorimetaani	mg/kg						Novalab 040
Trikloorieteeni	mg/kg						Novalab 049
Klooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
Bromoformi	mg/kg						Novalab 049
Hiilitetrakloridi	mg/kg						Novalab 049
1,2,3-triklooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,2,4-triklooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,1,1-trikloorietaani	mg/kg						Novalab 049
Isopropylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,3,5-trimetyylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
Sec-butylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,2,4-trimetyylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
n-butylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
p-isopropyylitolueeni	mg/kg						Novalab 049
Bromobentseeni	mg/kg						Novalab 049
Bromodikloorimetaani	mg/kg						Novalab 049
Tert-butylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,2-dibromo-3-klooripropaani	mg/kg						Novalab 049
1,2-diklooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
1,3-diklooribentseeni	mg/kg						Novalab 049
Trans-1,3-diklooripropeeni	mg/kg						Novalab 049
N-propylibentseeni	mg/kg						Novalab 049
Styreeni	mg/kg						Novalab 049
1,1,1,2-tetrakloorietaani	mg/kg						Novalab 049
Trans-1,2-dikloorieteeni	mg/kg						Novalab 049
Cis-1,2-dikloorieteeni	mg/kg						Novalab 049
1,1-diklooripropeeni	mg/kg						Novalab 049
Cis-1,3-diklooripropeeni	mg/kg						Novalab 049
Tetrakloorieteeni	mg/kg						Novalab 049
Dibromidikloorimetaani	mg/kg						Novalab 049
Naftaleeni	mg/kg						Novalab 049

\* Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyäessä.



## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

		15MN 5822 PL3/2-2,5	15MN 5823 PL3/2,5-3	15MN 5824 PL3/3-3,5	15MN 5825 PL3/3,5-4	15MN 5827 PL3/6-6,5	
Heksaklooributadieeni	mg/kg						Novalab 049
1,3-diklooripropaani	mg/kg						Novalab 049
Trikloorifluorimetaani	mg/kg						Novalab 049
Kloroformi	mg/kg						Novalab 049
1,1,2,2-tetrakloorietaani	mg/kg						Novalab 049
4-klooritolueeni	mg/kg						Novalab 049
2-klooritolueeni	mg/kg						Novalab 049
Vinyylidikloridi	mg/kg						Novalab 049
Naftaleeni	mg/kg						Novalab 050*
Asenaftyleeni	mg/kg						Novalab 050
Asenaftteeni	mg/kg						Novalab 050*
Fluoreeni	mg/kg						Novalab 050*
Fenantreeni	mg/kg						Novalab 050*
Antraseeni	mg/kg						Novalab 050*
Fluoranteeni	mg/kg						Novalab 050*
Pyreeni	mg/kg						Novalab 050*
Bentso(a)antraseeni	mg/kg						Novalab 050*
Kryseeni	mg/kg						Novalab 050*
Bentso(b)fluoranteeni	mg/kg						Novalab 050*
Bentso(k)fluoranteeni	mg/kg						Novalab 050*
Bentso(a)pyreeni	mg/kg						Novalab 050*
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	mg/kg						Novalab 050*
Dibentso(a,h)antraseeni	mg/kg						Novalab 050*
Bentso(g,h,i)peryleeni	mg/kg						Novalab 050*
PAH-yhdisteiden summa	mg/kg						Novalab 050*
PCB-28	mg/kg						Novalab 051
PCB-52	mg/kg						Novalab 051
PCB-101	mg/kg						Novalab 051
PCB-118	mg/kg						Novalab 051
PCB-138	mg/kg						Novalab 051
PCB-153	mg/kg						Novalab 051
PCB-180	mg/kg						Novalab 051
PCB-yhdisteiden summa	mg/kg						Novalab 051
Kalium (K)	g/kg						Novalab 067
Magnesium (Mg)	g/kg						Novalab 067

\* Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.



**TUTKIMUSTODISTUS**

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

		15MN 5822 PL3/2-2,5	15MN 5823 PL3/2,5-3	15MN 5824 PL3/3-3,5	15MN 5825 PL3/3,5-4	15MN 5827 PL3/6-6,5	
Natrium (Na)	g/kg						Novalab 067
Rikki (S)	g/kg						Novalab 067
Arseeni (As)	mg/kg	26		25			Novalab 068*
Kadmium (Cd)	mg/kg	2,3		2,1			Novalab 068*
Koboltti (Co)	mg/kg	15		14			Novalab 068*
Kromi (Cr)	mg/kg	42		38			Novalab 068*
Kupari (Cu)	mg/kg	85		73			Novalab 068*
Elohopea (Hg)	mg/kg	< 0,50		< 0,50			Novalab 068*
Nikkeli (Ni)	mg/kg	47		43			Novalab 068*
Lyijy (Pb)	mg/kg	100		99			Novalab 068*
Antimoni (Sb)	mg/kg	7,3		6,7			Novalab 068*
Vanadiini (V)	mg/kg	110		100			Novalab 068*
Sinkki (Zn)	mg/kg	330		290			Novalab 068*
Kloridi (Cl-) tulokosteassa	mg/kg						SFS-EN 13652, Nova- lab 020
Syanidi, kokonais (CNkok) kuiva-aineessa	mg/kg						SFS 5747:1992, mod.

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittausepävarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.

**TUTKIMUSTODISTUS**Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015

FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 HelsinkiTilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

Näytetunnus		15MN 5828	15MN 5829	15MN 5830			
Näytteen nimi		PL3/7-7,5	PL3/9-9,5	PL2/4-4,5			
Näytteen saapumispäivä		13.11.2015	13.11.2015	13.11.2015			
Näytteen aloituspäivä		27.11.2015	27.11.2015	25.11.2015			
Näytteen valmistuspäivä		07.12.2015	01.12.2015	01.12.2015			
<b>Määritykset</b>							
Kuiva-aine	%	59,4	46,5	83,6			Novalab 010
Hehkutushäviö kuiva-aineessa	%						Novalab 009
Kokonaishiili kuiva-aineessa	%						
pH							SFS 3012:1979 (Novalab 017)
Öljypitoisuus (>C10-C21)	mg/kg						ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus (>C21-<C40)	mg/kg						ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus (>C10-<C40)	mg/kg						ISO 16703:2004, mod.*
Öljypitoisuus summa (>C5-<C40)	mg/kg						ISO 16703:2004, mod.
>C5-C10	mg/kg						Novalab 049
MTBE	mg/kg						Novalab 049
TAME	mg/kg						Novalab 049
Bentseeni	mg/kg	< 0,01					Novalab 049
Tolueeni	mg/kg	< 0,01					Novalab 049
Ksyleeni	mg/kg	< 0,01					Novalab 049
Etyylibentseeni	mg/kg	< 0,01					Novalab 049
1,2-dikloorietaani	mg/kg	< 0,01					Novalab 049
1,2-dibromietaani	mg/kg	< 0,01					Novalab 049
1,1,2-trikloorietaani	mg/kg	< 0,01					Novalab 049
1,1-dikloorieteeni	mg/kg	< 0,01					Novalab 049

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyäessä.



## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015

FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 HelsinkiTilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

		15MN 5828 PL3/7-7,5	15MN 5829 PL3/9-9,5	15MN 5830 PL2/4-4,5		
1,2-diklooripropaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
2,2-diklooripropaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,4-diklooribentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,1-dikloorietaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Dikloorimetaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 040
Trikloorieteeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Klooribentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Bromoformi	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Hiilitetrakloridi	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,2,3-triklooribentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,2,4-triklooribentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,1,1-trikloorietaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Isopropylibentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,3,5-trimetylibentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Sec-butylibentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,2,4-trimetylibentseen	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
n-butylibentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
p-isopropyylitolueeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Bromobentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Bromodikloorimetaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Tert-butylibentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,2-dibromo-3-klooripropaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,2-diklooribentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,3-diklooribentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Trans-1,3-diklooripropeeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
N-propylibentseeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Styreeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,1,1,2-tetrakloorietaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Trans-1,2-dikloorieteeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Cis-1,2-dikloorieteeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,1-diklooripropeeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Cis-1,3-diklooripropeeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Tetrakloorieteeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Dibromodikloorimetaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Naftaleeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.

## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015


FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 Helsinki
Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

		15MN 5828 PL3/7-7,5	15MN 5829 PL3/9-9,5	15MN 5830 PL2/4-4,5		
Heksaklooributadieeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,3-diklooripropaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Trikloorifluorimetaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Kloroformi	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
1,1,2,2-tetrakloorietaani	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
4-klooritolueeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
2-klooritolueeni	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Vinyylikloridi	mg/kg	< 0,01				Novalab 049
Naftaleeni	mg/kg					Novalab 050*
Asenaftyleeni	mg/kg					Novalab 050
Asenafteeni	mg/kg					Novalab 050*
Fluoreeni	mg/kg					Novalab 050*
Fenantreeni	mg/kg					Novalab 050*
Antraseeni	mg/kg					Novalab 050*
Fluoranteeni	mg/kg					Novalab 050*
Pyreeni	mg/kg					Novalab 050*
Bentso(a)antraseeni	mg/kg					Novalab 050*
Kryseeni	mg/kg					Novalab 050*
Bentso(b)fluoranteeni	mg/kg					Novalab 050*
Bentso(k)fluoranteeni	mg/kg					Novalab 050*
Bentso(a)pyreeni	mg/kg					Novalab 050*
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	mg/kg					Novalab 050*
Dibentso(a,h)antraseeni	mg/kg					Novalab 050*
Bentso(g,h,i)peryleeni	mg/kg					Novalab 050*
PAH-yhdisteiden summa	mg/kg					Novalab 050*
PCB-28	mg/kg					Novalab 051
PCB-52	mg/kg					Novalab 051
PCB-101	mg/kg					Novalab 051
PCB-118	mg/kg					Novalab 051
PCB-138	mg/kg					Novalab 051
PCB-153	mg/kg					Novalab 051
PCB-180	mg/kg					Novalab 051
PCB-yhdisteiden summa	mg/kg					Novalab 051
Kalium (K)	g/kg					Novalab 067
Magnesium (Mg)	g/kg					Novalab 067

\* Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.

**TUTKIMUSTODISTUS**Tilaus: 1505609  
Pvm: 7.12.2015

FCG Suunnittelu ja Tekniikka

Osmontie 34  
00610 HelsinkiTilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

		15MN 5828 PL3/7-7,5	15MN 5829 PL3/9-9,5	15MN 5830 PL2/4-4,5		
Natrium (Na)	g/kg					Novalab 067
Rikki (S)	g/kg					Novalab 067
Arseeni (As)	mg/kg					Novalab 068*
Kadmium (Cd)	mg/kg					Novalab 068*
Koboltti (Co)	mg/kg					Novalab 068*
Kromi (Cr)	mg/kg					Novalab 068*
Kupari (Cu)	mg/kg					Novalab 068*
Elohopea (Hg)	mg/kg					Novalab 068*
Nikkeli (Ni)	mg/kg					Novalab 068*
Lyijy (Pb)	mg/kg					Novalab 068*
Antimoni (Sb)	mg/kg					Novalab 068*
Vanadiini (V)	mg/kg					Novalab 068*
Sinkki (Zn)	mg/kg					Novalab 068*
Kloridi (Cl-) tulokosteassa	mg/kg					SFS-EN 13652, Nova- lab 020
Syanidi, kokonais (CNkok) kuiva-aineessa	mg/kg					SFS 5747:1992, mod.

**Novalab Oy**Matti Mäkelä  
Laboratorion johtaja

Tämä tutkimustodistus on allekirjoitettu sähköisesti.

**Laskutus** Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto, PL 2281, 00099 Helsingin kaupunki

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyäessä.

**TUTKIMUSTODISTUS**Tilaus: 1505598  
Pvm: 14.12.2015FCG Suunnittelu ja Tekniikka  
Teemu Siika  
Osmontie 34  
00610 HelsinkiTilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosio**

Näytetunnus		15MN 5774	15MN 5775	15MN 5776	15MN 5777	15MN 5778	
Näytteen nimi		PL1/1-1,5 + PL1/1,5-2	PL1/2-2,5+ PL1/2,5-3	PL1/4-4,5	PL1/6-6,5 + PL1/6,5-7	PL1/7,5-8 + PL1/8,5-9 + PL1/10,5-- 11	
Näytteen saapumispäivä		12.11.2015	12.11.2015	12.11.2015	12.11.2015	12.11.2015	
Näytteen aloituspäivä		23.11.2015	25.11.2015	01.12.2015	01.12.2015	01.12.2015	
Näytteen valmistuspäivä		09.12.2015	10.12.2015	10.12.2015	10.12.2015	09.12.2015	
<b>Määrittelykset</b>							
pH		7.3	9.4	8.7	8.9	7.5	SFS 3021:1979 (Novalab 079)
Karbonaatti (CO <sub>3</sub> 2-)	mg/l		35	9,0	15		SFS 3005
Vetykarbonaatti (HCO <sub>3</sub> -)	mg/l	31	<2	150	110	65	SFS 3005
Kalsium, liukoinen (CaLiuk)	mg/l	53	170	66	58	9,8	Novalab 067
Kalium, liukoinen (KLiuk)	mg/l	3,4	4,2	7,6	38	13	Novalab 067
Magnesium, liukoinen (Mgliuk)	mg/l	1,4	< 0,1	13	0,11	10	Novalab 067
Natrium, liukoinen (Naliuk)	mg/l	2,2	12	10	190	180	Novalab 067
Rikki, liukoinen (S)	mg/l	42	470	54	400	42	Novalab 067
Sulfaatti (SO <sub>4</sub> )	mg/l	130	1400	160	1200	130	Novalab 067*
1-vaiheinen uutto		tehty	tehty	tehty	tehty	tehty	
Hydroksidi (OH-)	mg/l						SFS 3005
Alkaliniteetti	mmol/l	0.50	1,2	2,7	2,3	1.1	St.Methods 1998, SFS- EN ISO 9963-- 1:1996 (Novalab 078), mod.
Kloridi (Cl-)	mg/l	3,5	200	11	300	250	Novalab 020
Sähkönjohtavuus	mS/m	33	91	49	130	110	SFS-EN 27888:1994 (Novalab 080)
Kokonaiskovuus	mmol/l	1,40	4,30	2,20	1,40	0,66	Novalab 067

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittausepävarmuudet ovat saatavilla pyydettyäessä.

**TUTKIMUSTODISTUS**

Tilaus: 1505598  
Pvm: 14.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka  
Teemu Siika  
Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

15MN	15MN	15MN	15MN	15MN
5774	5775	5776	5777	5778
PL1/1-1,5	PL1/2-2,5+ PL1/4-4,5		PL1/6-6,5	PL1/7,5-8
+	PL1/2,5-3		+	+
PL1/1,5-2			PL1/6,5-7	PL1/8,5-9
				+
				PL1/10,5--
				11

Haihdutusjäännös	mg/l	215	750	360	1160	1360	SFS 3008
------------------	------	-----	-----	-----	------	------	----------

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyäessä.

**TUTKIMUSTODISTUS**

Tilaus: 1505598  
Pvm: 14.12.2015

FCG Suunnittelu ja Tekniikka  
Teemu Siika  
Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosioke**

Näytetunnus		15MN 5779	15MN 5780	15MN 5781	15MN 5782	15MN 5783	
Näytteen nimi		PL2/0,5-- 1,0 + PL2/1,0-- 1,5 + 1,5-- 2,0	PL2/3-3,5	PL2/4-4,5 + PL2/5-- 5,5 + PL2/7-7,5	PL3/1,5-2	PL3/2-2,5 + PL3/2,5-3 + PL3/3-- 3,5	
Näytteen saapumispäivä		12.11.2015	12.11.2015	12.11.2015	12.11.2015	12.11.2015	
Näytteen aloituspäivä		01.12.2015	01.12.2015	01.12.2015	01.12.2015	04.12.2015	
Näytteen valmistuspäivä		10.12.2015	09.12.2015	09.12.2015	09.12.2015	10.12.2015	
<b>Määrittelykset</b>							
pH		8,5	8,1	7,5	7,7	11	SFS 3021:1979 (Novalab 079)
Karbonaatti (CO <sub>3</sub> 2-)	mg/l	2,7				20	SFS 3005
Vetykarbonaatti (HCO <sub>3</sub> -)	mg/l	77	140	97	61	<2	SFS 3005
Kalsium, liukoinen (CaLiuk)	mg/l	45	27	10	33	210	Novalab 067
Kalium, liukoinen (KLiuk)	mg/l	6,1	15	16	3,8	8,2	Novalab 067
Magnesium, liukoinen (Mgliuk)	mg/l	3,4	24	13	1,7	0,16	Novalab 067
Natrium, liukoinen (Naliuk)	mg/l	6,2	160	180	1,1	3,3	Novalab 067
Rikki, liukoinen (S)	mg/l	36	110	47	15	170	Novalab 067
Sulfaatti (SO <sub>4</sub> )	mg/l	110	340	140	46	500	Novalab 067*
1-vaiheinen uutto		tehty	tehty	tehty	tehty	tehty	
Hydroksidi (OH-)	mg/l					16	SFS 3005
Alkaliniteetti	mmol/l	1,3	2,3	1,6	1,0	1,6	St.Methods 1998, SFS- EN ISO 9963-- 1:1996 (Novalab 078), mod.
Kloridi (Cl-)	mg/l	3,9	190	240	0,66	2,8	Novalab 020
Sähkönjohtavuus	mS/m	31	120	110	20	110	SFS-EN 27888:1994 (Novalab 080)
Kokonaiskovuus	mmol/l	1,30	1,70	0,81	0,90	5,30	Novalab 067
Haihdutuskäynnös	mg/l	200	870	1400	140	815	SFS 3008

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittausepävarmuudet ovat saatavilla pyydettyäessä.





## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505598  
Pvm: 14.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka  
Teemu Siika  
Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

Näytetunnus		15MN 5784					
Näytteen nimi		PL3/6-6,5 + PL3/7-- 7,5 + PL3/9-9,5					
Näytteen saapumispäivä		12.11.2015					
Näytteen aloituspäivä		04.12.2015					
Näytteen valmistuspäivä		09.12.2015					
<b>Määritykset</b>							
pH		8,1					SFS 3021:1979 (Novalab 079)
Karbonaatti (CO <sub>3</sub> 2-)	mg/l						SFS 3005
Vetykarbonaatti (HCO <sub>3</sub> -)	mg/l	88					SFS 3005
Kalsium, liukoinen (CaLiuk)	mg/l	10					Novalab 067
Kalium, liukoinen (KLiuk)	mg/l	14					Novalab 067
Magnesium, liukoinen (Mgliuk)	mg/l	14					Novalab 067
Natrium, liukoinen (Naliuk)	mg/l	190					Novalab 067
Rikki, liukoinen (S)	mg/l	40					Novalab 067
Sulfaatti (SO <sub>4</sub> )	mg/l	120					Novalab 067*
1-vaiheinen uutto		tehty					
Hydroksidi (OH-)	mg/l						SFS 3005
Alkaliniteetti	mmol/l	1,4					St.Methods 1998, SFS- EN ISO 9963-- 1:1996 (Novalab 078), mod.
Kloridi (Cl-)	mg/l	250					Novalab 020
Sähkönjohtavuus	mS/m	110					SFS-EN 27888:1994 (Novalab 080)
Kokonaiskovuus	mmol/l	0,81					Novalab 067
Haihdutusjäännös	mg/l	1430					SFS 3008

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittausepävarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.

**TUTKIMUSTODISTUS**

Tilaus: 1505598  
Pvm: 14.12.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka  
Teemu Siika  
Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Maa, P15168P013, Kyläsaari, korroosiokoe**

---

**Lausunto** Tulokset on ilmoitettu pitoisuuksina näytteestä tehdyssä vesiuutteessa.

**Novalab Oy**

Matti Mäkelä  
Laboratorion johtaja

Tämä tutkimustodistus on allekirjoitettu sähköisesti.

**Lisätiedot** Maanäytteistä tehtiin yksivaiheinen uutto LS10 sen selvittämiseksi, mitä korroosioon liittyviä yhdisteitä maasta veteen liukenee. Menetelmällä korvattiin puuttuva huokosvesi.

**Jakelu** Teemu Siika, teemu.siika@fcg.fi

**Laskutus** Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto, PL 2281, 00099 Helsingin kaupunki

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittausepävarmuudet ovat saatavilla pyydettyäessä.

**TUTKIMUSTODISTUS**Tilaus: 1505562  
Pvm: 23.11.2015FCG Suunnittelu ja Tekniikka  
Johannes Nurmi  
Osmontie 34  
00610 HelsinkiTilauksen nimi: **Vesi, P17681P007, Kalasataman pohjoiset alueet**

Näytetunnus		15VN 2687					
Näytteen nimi		6784/010					
Näytteen saapumispäivä		11.11.2015					
Näytteen aloituspäivä		11.11.2015					
Näytteen valmistuspäivä		20.11.2015					
<b>Määritykset</b>							
pH		12					SFS 3021:1979 (Novalab 079)*
Öljypitoisuus (>C10-C21)	mg/l	2,1					Novalab 053
Öljypitoisuus (>C21-<C40)	mg/l	0,67					Novalab 053
Öljypitoisuus (>C10-<C40)	mg/l	2,8					Novalab 053
Öljypitoisuus summa (>C5-<C40)	mg/l	2,8					Novalab 053
>C5-C10	mg/l	0,080					Novalab 040
MTBE	mg/l	< 0,001					Novalab 040*
TAME	mg/l	< 0,001					Novalab 040*
Bentseeni	mg/l	0,014					Novalab 040*
Tolueeni	mg/l	0,006					Novalab 040*
Ksyleeni	mg/l	0,0073					Novalab 040*
Etyylibentseeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040*
1,2-dikloorietaani	µg/l	< 0,5					Novalab 040
1,2-dibromietaani	µg/l	< 0,5					Novalab 040
1,1,2-trikloorietaani	mg/l	< 0,001					Novalab 040
1,1-dikloorieteeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
1,2-diklooripropaani	mg/l	< 0,001					Novalab 040
2,2-diklooripropaani	mg/l	< 0,001					Novalab 040
1,4-diklooribentseeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
1,1-dikloorietaani	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Dikloorimetaani	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Trikloorieteeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Klooribentseeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Bromoformi	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Hiilitetrakloridi	mg/l	< 0,001					Novalab 040

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyäessä.

**TUTKIMUSTODISTUS**

Tilaus: 1505562  
Pvm: 23.11.2015

FCG Suunnittelu ja Tekniikka  
Johannes Nurmi  
Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Vesi, P17681P007, Kalasataman pohjoiset alueet**

15VN  
2687  
6784/010

1,2,3-triklooribentseeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
1,2,4-triklooribentseeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
1,1,1-trikloorietaani	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Isopropylibentseeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
1,3,5-trimetyylibentseeni	mg/l	0,002					Novalab 040
Sec-butylibentseeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
1,2,4-trimetyylibentseeni	mg/l	0,018					Novalab 040*
n-butylibentseeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
P-isopropyylitolueeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Bromobentseeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Bromodikloorimetaani	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Tert-butylibentseeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
1,2-dibromo-3-klooripropaani	mg/l	< 0,001					Novalab 040
1,2-diklooribentseeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
1,3-diklooribentseeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Trans-1,3-diklooripropeeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
N-propylibentseeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Styreeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040*
1,1,1,2-tetrakloorietaani	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Trans-1,2-dikloorieteeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Cis-1,2-dikloorieteeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
1,1-diklooripropeeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Cis-1,3-diklooripropeeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Tetrakloorieteeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Dibromodikloorimetaani	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Heksaklooributadieeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
1,3-diklooripropaani	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Trikloorifluorimetaani	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Kloroformi	mg/l	< 0,001					Novalab 040
1,1,2,2-tetrakloorietaani	mg/l	< 0,001					Novalab 040
4-klooritolueeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
2-klooritolueeni	mg/l	< 0,001					Novalab 040
Vinyylikloridi	mg/l	0,024					Novalab 040
Naftaleeni	µg/l	990					Novalab 072
Asenaftyleeni	µg/l	9,2					Novalab 072

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.



## TUTKIMUSTODISTUS

Tilaus: 1505562  
Pvm: 23.11.2015FCG Suunnittelu ja Tekniikka  
Johannes Nurmi  
Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: Vesi, P17681P007, Kalasataman pohjoiset alueet

15VN  
2687  
6784/010

Asenaftteeni	µg/l	1,5				Novalab 072
Fluoreeni	µg/l	2,4				Novalab 072
Fenantreeni	µg/l	3,9				Novalab 072
Antraseeni	µg/l	0,5				Novalab 072
Fluoranteeni	µg/l	2,5				Novalab 072
Pyreeni	µg/l	1,8				Novalab 072
Bentso(a)antraseeni	µg/l	0,8				Novalab 072
Kryseeni	µg/l	0,9				Novalab 072
Bentso(b)fluoranteeni	µg/l	1,1				Novalab 072
Bentso(k)fluoranteeni	µg/l	0,7				Novalab 072
Bentso(a)pyreeni	µg/l	0,8				Novalab 072
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	µg/l	0,5				Novalab 072
Dibentso(a,h)antraseeni	µg/l	< 0,1				Novalab 072
Bentso(g,h,i)peryleeni	µg/l	0,3				Novalab 072
PAH-yhdisteiden summa	µg/l	1000				Novalab 072
Arseeni, liukoinen (AsLiuk)	mg/l	0,015				Novalab 068
Kadmium, liukoinen (CdLiuk)	mg/l	< 0,006				Novalab 068
Koboltti, liukoinen (Co)	mg/l	< 0,006				Novalab 068
Kromi, liukoinen (CrLiuk)	mg/l	< 0,006				Novalab 068
Kupari, liukoinen (CuLiuk)	mg/l	< 0,006				Novalab 068
Elohopea, liukoinen (HgLiuk)	mg/l	< 0,01				Novalab 068
Nikkeli, liukoinen (NiLiuk)	mg/l	< 0,006				Novalab 068
Lyijy, liukoinen (PbLiuk)	mg/l	< 0,01				Novalab 068
Antimoni, liukoinen (SbLiuk)	mg/l	0,021				Novalab 068
Vanadiini, liukoinen (VLiuk)	mg/l	0,0060				Novalab 068
Sinkki, liukoinen (ZnLiuk)	mg/l	< 0,006				Novalab 068
Magnesium (Mg)	mg/l	8,1				Novalab 067*
Sulfaatti (SO4)	mg/l	250				Novalab 067*
Syanidi, kokonais (CNkok)	mg/l	0.02				SFS 5747:1992, mod.
Sähkönjohtavuus	µS/cm	2300				SFS-EN 27888:1994 (Novalab 080)*
Kiintoaine	mg/l	590				SFS-EN

\* Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittauserävarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.

**TUTKIMUSTODISTUS**

Tilaus: 1505562  
Pvm: 23.11.2015



FCG Suunnittelu ja Tekniikka  
Johannes Nurmi  
Osmontie 34  
00610 Helsinki

Tilauksen nimi: **Vesi, P17681P007, Kalasataman pohjoiset alueet**

		15VN 2687 6784/010					872:2005 (Novalab 091)*
Ammoniumtyppi (NH <sub>4</sub> -N)	mg/l	44					Novalab 086*
Sameus	NTU	290					SFS-EN ISO 7027 (2000)

**Novalab Oy**

Jarkko Kupari  
Kemisti

Tämä tutkimustodistus on allekirjoitettu sähköisesti.

**Lisätiedot** Vesinäytteelle hiilivetytulosten mittausepävarmuus: 0,05-0,2 mg/l  $\pm$  50 %, 0,2-0,5 mg/l  $\pm$  30 % ja yli 0,5 mg/l  $\pm$  20 %. Vesinäytteelle yksittäisten bensiinihiilivetyjen mittausepävarmuus: 0,001-0,01 mg/l  $\pm$  100 %, 0,011-0,01 mg/l  $\pm$  50 %, 0,1 mg/l - 1,0 mg/l  $\pm$  30 % ja yli 1,0 mg/l  $\pm$  20 %. Vesinäytteelle yksittäisten PAH-hiilivetyjen mittausepävarmuus:  $\pm$  40% Vesinäytteelle metallianalyysin mittausepävarmuusarviot: 0,006-0,1 mg/l  $\pm$  50 %, 0,11-0,5 mg/l  $\pm$  20 % ja yli 0,5 mg/l  $\pm$  10 %.

**Jakelu** Johannes Nurmi, johannes.nurmi@fcg.fi  
Teemu Siika, teemu.siika@fcg.fi

**Laskutus** Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto, PL 2281, 00099 Helsingin kaupunki

\*Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Tulokset pätevät vain testatuille näytteille. Raporttia ei saa kopioida osittain ilman testauslaboratorion lupaa. Analyysien mittausepävarmuudet ovat saatavilla pyydettyessä.

LIITE 3: MAALAJIMÄÄRITYSTEN TULOKSET



Piste No	1
Yk	25498605.7
Xk	6676084.3
Maanpinta	+2.32
Vedenpinta	

Tutk. No	6784 /
Tiedosto	V:\Geolab\datat\6784.dat
Kohde	TERÄSKSEN JA BETONIN KORROOSIO MAASSA
Päivämäärä	17.12.2015
Suun.	MP

Maanäytteiden tutkimusilmoitus

Astian numero	Syvyys [m]	N. otin	Kartiokoe			Tilavuuspaino		Huokosluku	Vesipitoisuus [%]	Maalaji	Huom.
			H3/H1	Sk [kPa]	F [%]	t.p./w [kN/m3]	t.p./d [kN/m3]				
	0.00-0.50	R	-	-	-	-	-	-	19.5	srHkTä	As+Ti
	0.50-1.00	R	-	-	-	-	-	-	2.9	srHkTä	Be+As
	1.00-1.50	R	-	-	-	-	-	-	4.8	srHkTä	Mustaa+As
	1.50-2.00	R	-	-	-	-	-	-	20.8	siHkTä	Mustaa+La+As
	2.00-2.50	R	-	-	-	-	-	-	21.0	siHkTä	Mustaa+La+Pap
	2.50-3.00	R	-	-	-	-	-	-	25.4	siHkTä	Mustaa+Me+La+Tuhkaa?
	3.00-3.50	R	-	-	-	-	-	-	-	Ei näy	
	3.50-4.00	R	-	-	-	-	-	-	-	Ei näy	
	4.00-4.50	R	-	-	-	-	-	-	36.4	siHkTä	Mustaa+Me+Po+Tuhkaa?
	4.50-5.00	R	-	-	-	-	-	-	-	Ei näy	
	5.00-5.50	R	-	-	-	-	-	-	-	Ei näy	
	5.50-6.00	R	-	-	-	-	-	-	10.3	saSiTä	Mustaa

Päiväys 17.12.2015

Tutki pm/jl

Tarkasti

Piste No	1
Yk	25498605.7
Xk	6676084.3
Maanpinta	+2.32
Vedenpinta	

Tutk. No	6784 /
Tiedosto	V:\Geolab\datat\6784.dat
Kohde	TERÄSKSEN JA BETONIN KORROOSIO MAASSA
Päivämäärä	17.12.2015
Suun.	MP

**Maanäytteiden tutkimusilmoitus**

Astian numero	Syvyys [m]	N. otin	Kartiokoe			Tilavuuspaino		Huokosluku	Vesipitoisuus [%]	Maalaji	Huom.
			H3/H1	Sk [kPa]	F [%]	t.p./w [kN/m3]	t.p./d [kN/m3]				
	6.00-6.50	R	-	-	-	-	-	-	84.8	SaTä	Mustaa+Me
	6.50-7.00	R	-	-	-	-	-	-	62.1	SaTä	Mustaa+La+Me
	7.50-8.00	Mk-26	-	-	-	13.5	7.3	2.63	84.9	Sa	
	8.50-9.00	Mk-26	-	-	-	13.7	7.3	2.62	86.9	Sa	
	10.50-11.00	Mk-26	-	-	-	15.5	10.1	1.62	53.7	Sa	Si seassa

Päiväys 17.12.2015

Tutki pm/jl

Tarkasti



Piste No	2
Yk	25498724.4
Xk	6676075.8
Maanpinta	+1.48
Vedenpinta	

Tutk. No	6784 /
Tiedosto	V:\Geolab\datat\6784.dat
Kohde	TERÄSKSEN JA BETONIN KORROOSIO MAASSA
Päivämäärä	17.12.2015
Suun.	MP

# Maanäytteiden tutkimusilmoitus

Astian numero	Syvyys [m]	N. otin	Kartiokoe			Tilavuuspaino		Huokosluku	Vesipitoisuus [%]	Maalaji	Huom.
			H3/H1	Sk [kPa]	F [%]	t.p./w [kN/m3]	t.p./d [kN/m3]				
	0.00-0.50	R	-	-	-	-	-	-	6.6	srHkTä	Mustaa
	0.50-1.00	R	-	-	-	-	-	-	14.7	srHkTä	Mustaa+Ti+La
	1.00-1.50	R	-	-	-	-	-	-	18.8	srHkTä	Mustaa+Me
	1.50-2.00	R	-	-	-	-	-	-	13.7	srHkTä	Mustaa+Me+La+Tuhkaa?
	2.00-2.50	R	-	-	-	-	-	-	-	Ei näy	
	2.50-3.00	R	-	-	-	-	-	-	-	Ei näy	
	3.00-3.50	R	-	-	-	-	-	-	32.1	saSi	Mustaa
	4.00-4.50	Mk-26	-	-	-	12.4	8.0	2.31	55.3	Sa	Si seassa+Mustaa
	5.00-5.50	Mk-26	-	-	-	14.7	8.8	2.02	67.3	Sa	Mustaa
	7.00-7.50	Mk-26	-	-	-	12.3	5.9	3.49	108.8	ljSa	

Päiväys 17.12.2015

Tutki pm/jl

Tarkasti

Piste No	3
Yk	25498778.2
Xk	6675918.0
Maanpinta	+1.52
Vedenpinta	

Tutk. No	6784 /
Tiedosto	V:\Geolab\datat\6784.dat
Kohde	TERÄSKSEN JA BETONIN KORROOSIO MAASSA
Päivämäärä	17.12.2015
Suun.	MP

**Maanäytteiden tutkimusilmoitus**

Astian numero	Syvyys [m]	N. otin	Kartiokoe			Tilavuuspaino		Huokosluku	Vesipitoisuus [%]	Maalaji	Huom.
			H3/H1	Sk [kPa]	F [%]	t.p./w [kN/m3]	t.p./d [kN/m3]				
	0.00-0.50	R	-	-	-	-	-	-	2.9	srHkTä	
	0.50-1.00	R	-	-	-	-	-	-	6.8	srHkTä	
	1.00-1.50	R	-	-	-	-	-	-	5.3	srHkTä	
	1.50-2.00	R	-	-	-	-	-	-	25.3	siHkTä	Sr +Mustaa+Tuhkaa?
	2.00-2.50	R	-	-	-	-	-	-	43.7	Si	Mustaa+Tuhkaa?
	2.50-3.00	R	-	-	-	-	-	-	44.1	hkSi	Mustaa+Tuhkaa?
	3.00-3.50	R	-	-	-	-	-	-	44.3	Si	Sr+Mustaa+Tuhkaa?
	3.50-4.00	R	-	-	-	-	-	-	17.8	Hk	Sr seassa+Mustaa
	4.00-4.50	R	-	-	-	-	-	-	43.6	Sa+Hk	
	4.50-5.00	R	-	-	-	-	-	-	179.7	Sa+Hk	
	6.00-6.50	Mk-26	-	-	-	-	-	-	62.7	Sa	Hk seassa
	7.00-7.50	Mk-26	-	-	-	-	-	-	82.8	Sa	Hk seassa

Päiväys 17.12.2015

Tutki pm/jl

Tarkasti



# LIITE 4: TERÄSPUTKIPAALUJEN VASTAANOTTOTODISTUS

## SSAB VASTAANOTTOTODISTUS

Nro A0155820.DAT

441820-001-001

EN 10204-3.1

Päivämäärä

30.09.2015

Sivu

1

Ostaja  
HELSINGIN KAUPUNKI  
KIINTEISTOVIRASTO OSTOLASKUT  
PL 2281  
00099 HELSINGIN KAUPUNKI FINLA

8394970

Toimitusosoite  
HGIN KAUPUNKI/GEOTEKNINEN VIRASTO  
AURANMAAN TERÄSPAALUTTAJAT OY  
ALITALONTIE 311A  
21480 PRUNKILA

8394970

Tilausvahvistus

441820

Tilauksenne

PM15801442, 10.9.2015

Viitteenne

GEON TYÖNRO: 6784

Lähetyspäivä

441820-001 30.09.2015

MERKINTÄ

Valmistajan merkki

Tarkastajan leima

Teräslaji

Sulatus - koeno

Putkinumero

Muut leimat

**SSAB**

S550J2H

XXXX-XX

Tuote

PAALUELEMENTTI

Teräslaji

S550J2H

RAKENNETERÄS

Tekniset vaatimukset

RR PILE ELEMENT

Tarkastus

### TUOTE-ERITTELY

Sulatusnro	Näyttenro	Nippu nro	Kpl	m	kg	Nippua
Pos. 1	RR140/8-E	L= 6000				
25273	25273031507	A0042150 A0042153				
26219	26219011508	A0042154				
Positio yhteensä			24	144	3744	3
Pos. 2	RR140/8-E	L= 6000				
19036	19036031797	A0041946				
24537	24537011303	A0041955				
25273	25273031507	49020173				
Positio yhteensä			24	144	3744	3
Positiot yhteensä			48	288	7488	6

Tuotteet on tarkastettu ja testattu ylläesitettyjen toimitusehtojen mukaisesti ja ne ovat asetettujen vaatimusten mukaisia.

### SSAB Europe Oy

Pulkkilan tehdas  
Laadunohjaus

Arto Törmälehto

www.ssab.com  
SSAB Europe Oy

Postiosoite

Lehtolantie 76  
FI-92600 PULKKILA

Puhelin

+ 358 20 59 11

Telefax

+ 358 20 59 27090

Yhtiön nimi

SSAB Europe Oy

Harvialantie 420

FI-13300 HÄMEENLINNA

Kotipaikka

HÄMEENLINNA

Y-tunnus

2389445-7

EN 10204-3.1

Päivämäärä  
30.09.2015

Sivu

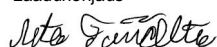
2

Pos.	Sulatusnro	CEV	Sulatusanalyysi %														
			C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Cu	Cr	N	Ti	Mo	Ni	B
1	25273	,30	,07	,18	1,20	,007	,004	,032	,042	,074	,012	,042	,007	,002	,005	,033	,0002
1	26219	,29	,06	,18	1,21	,009	,004	,034	,043	,074	,012	,039	,006	,002	,005	,035	,0002
2	19036	,29	,06	,19	1,20	,009	,003	,031	,044	,078	,014	,037	,006	,002	,004	,037	,0001
2	24537	,28	,05	,18	1,20	,008	,005	,034	,042	,079	,014	,035	,005	,001	,006	,041	,0001
2	25273	,30	,07	,18	1,20	,007	,004	,032	,042	,074	,012	,042	,007	,002	,005	,033	,0002

Pos.	Näytenumero	Vetokoe				Iskukoe					
		P2	Rp0.2 N/mm2	Rm N/mm2	A %	P3	oC	1(J)	2(J)	3(J)	AVG(J)
1	25273031507	11	629	668	18	117	-20	109	178	167	151
1	26219011508	11	603	643	20	117	-20	169	174	186	176
2	19036031797	11	620	653	17	117	-20	167	163	180	170
2	24537011303	11	602	647	20	117	-20	172	173	172	172
2	25273031507	11	629	668	18	117	-20	109	178	167	151

Visuaalinen tarkastus sekä mittatarkastus on suoritettu  
toimitusehtojen mukaisesti- Ei huomioita

SSAB Europe Oy

Pulkkilan tehdas  
Laadunohjaus

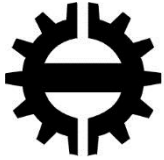
Arto Törmälehto

CEV:  $C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$ 

P2: 11=Perusaineesta pitkittäin

P3: 117=Iskukoesauva CV t x 10 mm, perusaineesta pitkittäin

## LIITE 5: BETONIPAALURAPORTTI



Tampereen Teknillinen Yliopisto  
Materiaaliopin laitos

# Koepaalutus betonipaaluilla

Työn tilaaja: Helsingin kaupunki

Raportti: 7.12.2015

Raportin tekijä: Jussi Laurila

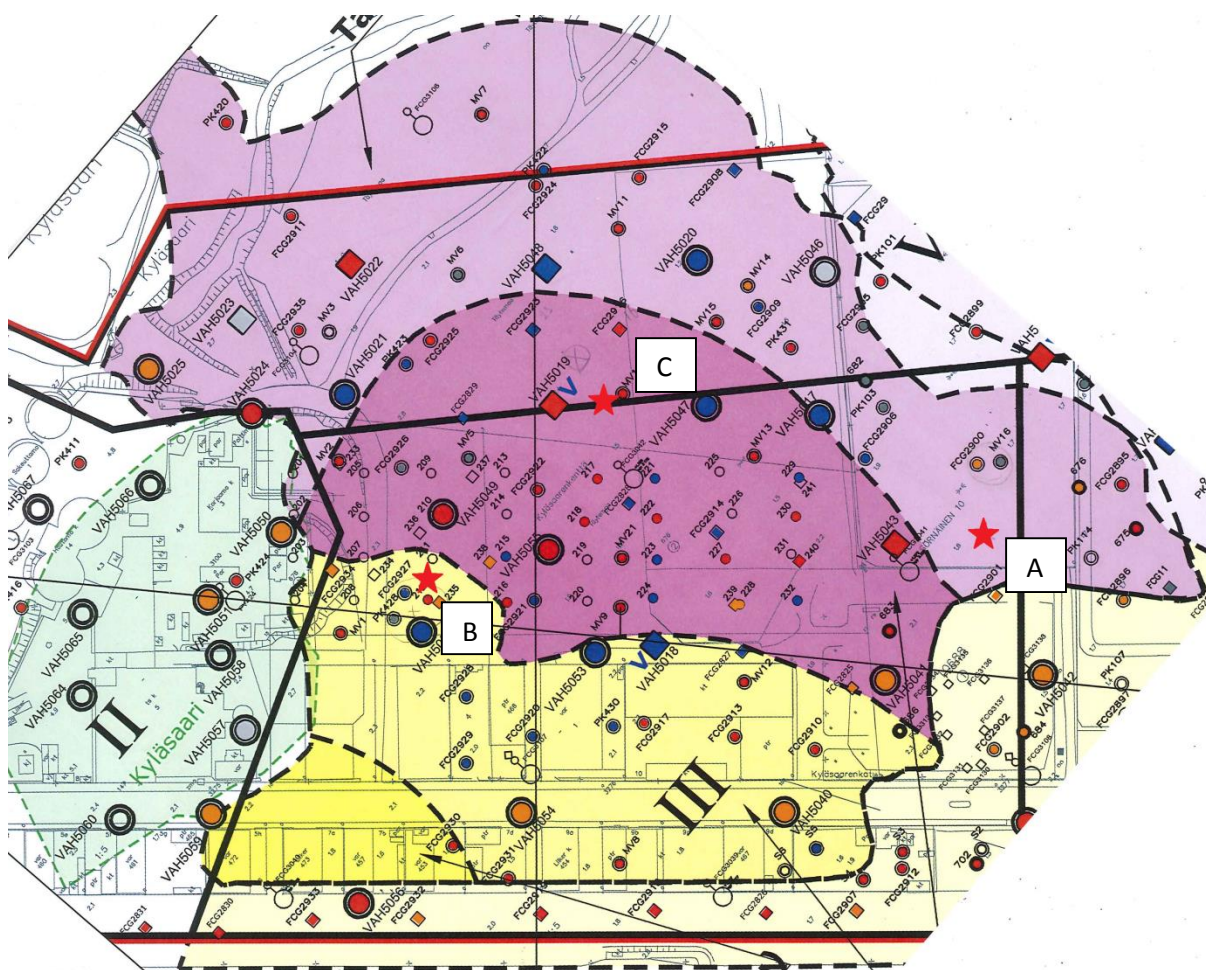
Viite: Kyläsaaren koepaalutus



Paalutus käynnissä koepisteessä B

## 1. Johdanto

Helsingin Vanhankaupungin lahdella sijaitsevaa Kyläsaaren rantaa on täytetty erilaisilla aineksilla vuosikymmeniä. 1950, 1960 ja 1970 luvuilla tehdyn täyttöjen alueille suoritettiin syksyllä 2015 kolmeen kohtaan koepaaluksia, paalutuskohdat A, B ja C on kukin merkitty oheiseen kuvaan 1 punaisella tähdellä. Paalutuskohtiin upotettiin kuhunkin 6 kappaletta 12m:n mittaista teräspaalua ja lisäksi kaksi samanpituista betonipaalua. Paalutuksen tarkoituksena on selvittää paalumateriaalien kestävyyttä tässä maaperässä. Tutkimuksesta valmistuu Tampereen teknillisessä yliopistossa Materiaaliopin laitoksella helmikuun 2016 lopussa diplomityö/Juuso Perolainen, jossa on esitelty maaperän koostumustietoja ja analyysimittauksia sekä on tarkasteltu teräspaalujen kestävyyttä maaperässä aikaisemmin maailmalla tehtyjen mittausten valossa. Lisäksi työssä on esitelty kohdat joihin koepaalu on upotettuina, tässä tarkasteltavat betonipaalut on upotettu näihin samoihin kohtiin. Tässä raportissa on tarkasteltu teräspaalujen viereen upotettujen betonipaalujen erityispiirteitä ja paaluille tehtyjä alustavia tutkimuksia. Upotetut teräspaalut ja betonipaalutkin nostetaan ylös maasta tulevinä vuosina.



Kuva 1: Koepaaluksen upotuspaikat on merkitty karttaan punaisilla tähdillä



## 2. Betonipaalut

Betoniset koepaalut upotettiin maahan juntaamalla 27.10.2015. Upotetut paalut olivat kaikki samanlaisia eikä niille suoritettu muita etukäteismittauksia kuin karkea dimensioiden mittausta, jossa todettiin paalujen halkaisijoiden ulkomittojen olevan piirustuksen antamien toleranssien rajoissa, ks. Liite 1. Paalutuksesta on esitetty lyhyt muistio Liitteessä 3.

Maahan upotetut paalut merkittiin upotuksen jälkeen hitsaamalla kirjaimin TB ja numeroin 1-6. Upotetut paalut ovat Liitteen 1 mukaisia 6m:n mittaisia Lujabetoni Oy:n valmistamia saman valmistuserän 16097/16.4.2015 180x180 Lpp1 SR Luja-pienpaaluja, joita upotettiin kaksi peräkkäin eli yht. 12m per paalu, kaksi paalua kolmelle eri alueella (A, B ja C), yhteensä siis 6 kpl 12m:n mittaista paalua. Paalut pyrittiin upottamaan noin 2m:n päähän teräspaalujen muodostamasta, aikaisemmin upotetusta kehästä. Upotuspisteistä, maaperästä ja paalujen sijainnista on tarkempaa tietoa Juuso Perolaisen TTY:llä valmistuvassa diplomityössä. Paalutusjärjestelyistä huolehtinut Helsingin kaupungin rakentamispalvelu Stara mittaa paalujen tarkemmat koordinaatit.

Paalutuksessa käytetty kone oli Junttan PM 16, jonka murikka oli tyyppiä OHK 3, vaimennin 10cm paksuinen koivu puun syiden suunnassa, erityisenä paalutusohjeena oli annettu paaluttaa varovasti. Tosin joitakin paaluja, ks. Liite 3, jouduttiin lyömään hieman voimakkaammin, koska erityisesti täytön pintakerroksessa oli paikka paikoin paalutusta haittaavia lohkaraita.

Tampereen teknilliseen yliopistoon Materiaaliopin laitokselle toimitettiin säilytettäväksi 6kpl 50cm:n pituisia paalutuspaalusta sahattua koekappaletta. Kappaleet oli sahattu timanttisahalla yhdestä Liitteessä 1 esitetyn piirustuksen mukaisesta teräsbetonipaalusta, jonka kokonaispituus on siis 6m ja poikkileikkauksen mitat 180x180mm.

## 3. Betonikappaleiden säilytys

Toimitetuista referenssikappaleista kolme on tarkoitus säilyttää kylmässä ulko-varastossa ja kolme lämpimässä sisä-varastossa, kaikki kappaleet säilytetään TTY:llä. Kappaleita on tarkoitus käyttää referenssikappaleina, kun ensimmäiset kolme kuudesta upotetusta paalusta nostetaan ylös viiden vuoden kuluttua ja myös toisen paaluerän noston yhteydessä myöhemmin. TTY:lle toimitettujen referenssikappaleiden lisäksi Helsingin kaupunki säilyttää varastossaan kaksi kokonaista 6m:n paalua ja noin 3m:n palan paalusta, josta TTY:lle toimitetut 6x50cm:n palat on sahattu irti.

## 4. Betonikappaleiden alustavat lujuuskokeet

Tässä vaiheessa referenssikappaleilla suoritettiin lujuuskokeet käyttäen perinteistä kimmovasaratestausta. Kimmovasarakokeiden suorittamiselle on annettu Liitteessä 2 tarkat ohjeet, joiden mukaan tässäkin toimitettiin, sillä poikkeuksella että näissä alustavissa kokeissa ei käytetty kalibroituja kimmovasaraa. Vasaran kalibrointi katsottiin tässä yhteydessä tarpeettomaksi, koska kokeissa mitattiin betonin tasalaatuisuutta ei niinkään sen lujuutta. Kuitenkin siinä vaiheessa, kun ylös nostettujen paalujen lujuutta mitataan ja verrataan referenssipaalujen lujuuteen, on ehdottomasti syytä käyttää kalibroituja kimmovasaraa. Tässä yhteydessä on tietenkin säilytyksessä



olleiden referenssibetonipaalujen lujuus mitattava ainakin osittain uudelleen, koska lujuus muuttuneen niiden säilytysaikana eikä nyt mitattuja arvoja niin ollen kannata käyttää.

Vertailulujuus lasketaan testauskohtien puristuslujuustuloksista ' by 50 Betoninormit 2012' kohdan 6.3.3 mukaisesti käyttäen seuraavia kaavoja, ks. Liite 2:

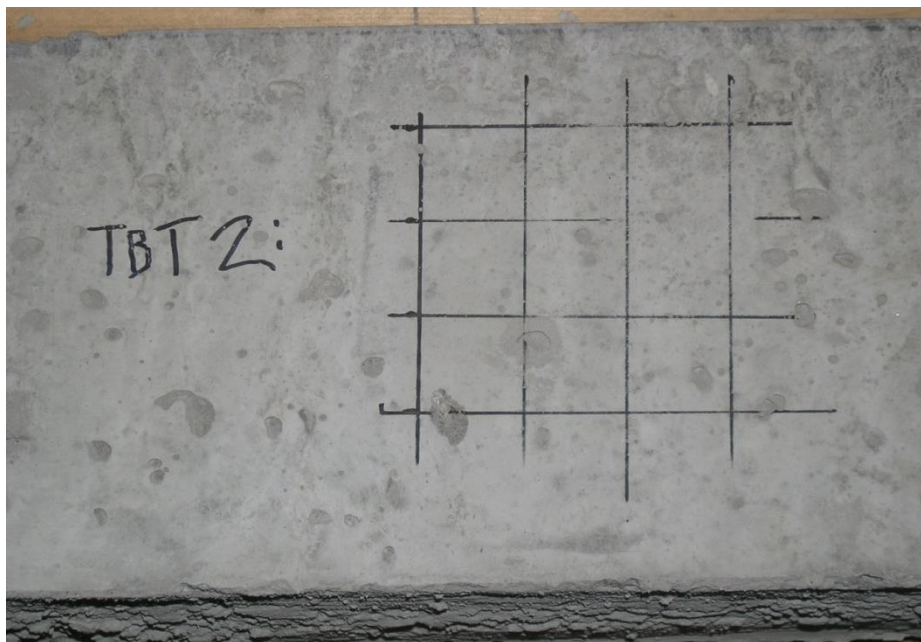
*Jos arvosteluerässä on vähintään 15 (tässä mitattiin 16) testauskohtaa, vertailulujuus  $K_k$  on pienempi seuraavassa lasketuista arvoista:*

$$K_k = f_{cm} - 1,48 \cdot s \text{ tai}$$

$$K_k = f_{cmin} + 4$$

*jossa  $f_{cm}$  on testauskohtien lujuusarvojen keskiarvo ja  $f_{cmin}$  on pienin testauskohdan lujuusarvo sekä  $s$  on testauskohtien lujuusarvojen keskihajonta.*

Betonin lujuus on luettavissa kimmovasaran valmistajan antamasta taulukosta. TTY:llä tehtyjen alustavien mittausten tulokset on koottu raportin loppuun taulukkoon 1. Mittaukset suoritettiin vähintään 15 minuuttia vesijohtovedellä liotetulta pinnalta siten, että testattava kappale oli betonilattian päällä ja kimmovasara pystyasennossa (eli mittauskulma -90 astetta). Ennen mittausta vasara purettiin ja voideltiin kevyesti ohuella aseöljyllä. Jokaisesta mittauskohdasta mitattiin kuvassa 2 esitetty 16:n mittauksen matriisi. Paalujen sivupinnoilla mittaus aloitettiin mittaamalla ensin betonivalun vapaan pinnan puoleinen mittausmatriisin ylärivi ja edeten siitä järjestyksessä alaspäin, jokainen rivi mitattiin vasemmalta oikealle. Mittauspisteiden välinen etäisyys toisistaan oli noin 30mm ja etäisyys paalun ulkopinnalta vähintään 30mm. Mittausta ei suoritettu muottipinnalla olevan näkyvän huokosen kohdalta.



Kuva 2: TBT 2 kappaleen sivupintaan piirretty testausmatriisi kuivana ennen pinnan kastelemista. Mittaus suoritettiin viivojen risteyskohdasta tai mahdollisimman läheltä sitä, jos risteyskohdassa oli valuhuokonen. Betonin vapaa pinta on kuvassa alaspäin.

Mittausten tulokset on esitetty Taulukossa 1 raportin lopussa. Keskimääräinen mittaustulos laskettiin 16 mittauksen matriisista yhdessä keskihajonnan kanssa, nämä arvot on ilmoitettu kunkin mittausmatriisin alla. Lisäksi laskettiin jokaisen rivin eli neljän mittauksen keskiarvo, jotta eri rivien lujuutta voitiin vertailla keskenään. Betonin lujuuden määrittämiseen on käytetty taulukossa 1 keltaisella merkittyä laskettua arvoa Liitteessä 2 esitetyn ohjeen mukaisesti. Betonin lujuusarvo saadaan kimmovasaran valmistajan antamasta taulukosta. Mittauksista on koottuna yhteenveto Taulukkoon 2. Taulukon 2 mukaan suurin määritetty lujuus oli 300kg/cm<sup>2</sup> ja pienin 190 kg/cm<sup>2</sup> mitattuna koekappaleen TBT 3 pohjasta. Muutenkin kappale TBT 3 oli mitatuista koekappaleista pehmein.

Betonipaalun kappaleille tehtyjen mittausten lisäksi suoritettiin referenssimittaus Materiaaliopin raskaan hallin seinästä, maalatusta betonipinnasta, koordinaatit. Mittauksen tulokset on esitetty Taulukon 1 lopussa. Muista mittauksista poiketen tämä mittaus suoritettiin vaakatasossa, eli mittauskulma oli 0 astetta.

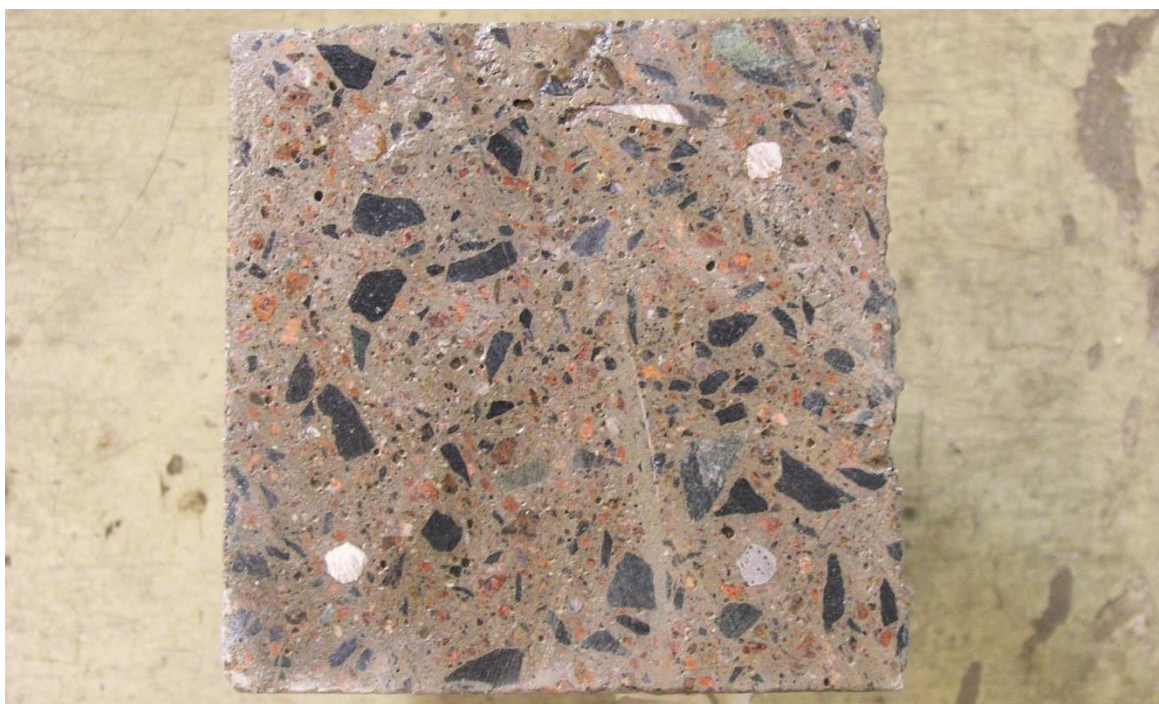
Taulukko 2: Yhteenveto kimmovasaralla määritetyistä betonin lujuusarvoista

Mittapiste:	Lujuus: kg/cm <sup>2</sup>	Kappaleen keskiarvo
TBT 1/ sivu 1:	240	
TBT 1/ Pohja:	255	
TBT 1/ sivu 2:	270	255
TBT 2/ sivu 1:	300	
TBT 2/ Pohja:	300	
TBT 2/ sivu 2:	290	297
TBT 3/ sivu 1:	250	
TBT 3/ Pohja:	190	
TBT 3/ sivu 2:	240	227
TBT 4/sivu 1:	245	
TBT 4/ Pohja:	290	
TBT 4/ sivu 2:	270	268
TBT 5/ sivu 1:	250	
TBT 5/ Pohja:	290	
TBT 5/ sivu 2:	260	267
TBT 6: sivu 1:	270	
TBT 6/ Pohja:	240	
TBT 6/ sivu 2:	260	257
<b>Minimi:</b>	<b>190</b>	
<b>Maksimi:</b>	<b>300</b>	
<b>Keskiarvo:</b>	<b>262</b>	
<b>Keskihajonta:</b>	<b>27.33</b>	

## 5. Betonipaalujen rakenne

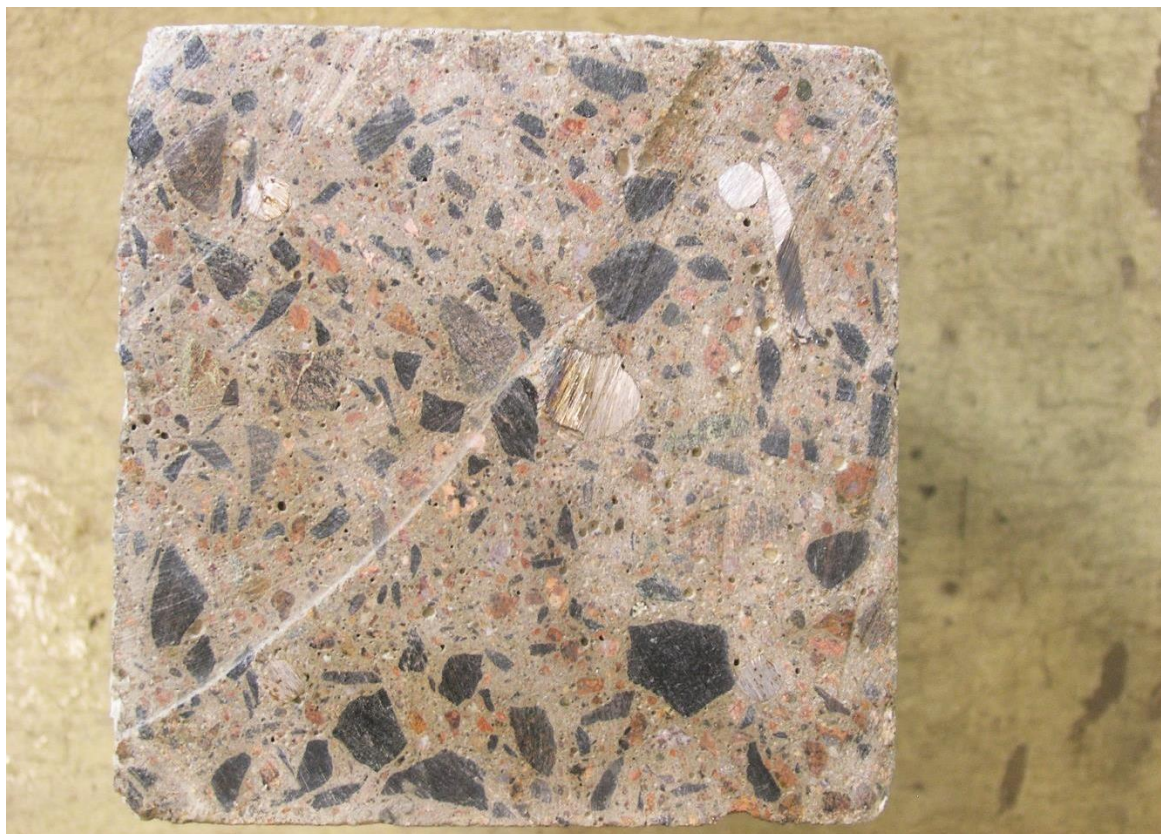
Betonipaalujen rakennetta kuvattiin timantilla sahatulta, pestyltä betonipaalun poikkileikkauspinnalta. Kuten edellä on esitetty, käytössä olleet kuusi koekappaletta oli sahattu kaikki samasta paalusta, joten paalujen välisiä eroja tämä rakennetutkimus ei tuo esiin.

Tehdyissä rakennetarkasteluissa keskityttiin huomioitiin betonimuotin täyttymistä, kiviaineksen kokoa ja sijaintia sekä raudoituksen sijaintia paalun sisällä. Alla esitetyissä kuvissa 3-6 betonin huokoisuus tulee esiin pieninä pyöreinä pisteinä, jotka eivät pienen kokonsa ja tasaisen esiintymisensä vuoksi vaikuta betonirakenteen lujuuteen. Raudoituksen todettiin sijaitsevan rakenteen sisällä liitteessä 1 esitetyn piirustuksen mukaisesti. Tehtyjen tarkastelujen perusteella voidaan todeta kiviaineksen olevan jakautuneena tasaisesti paalun rakenteeseen.

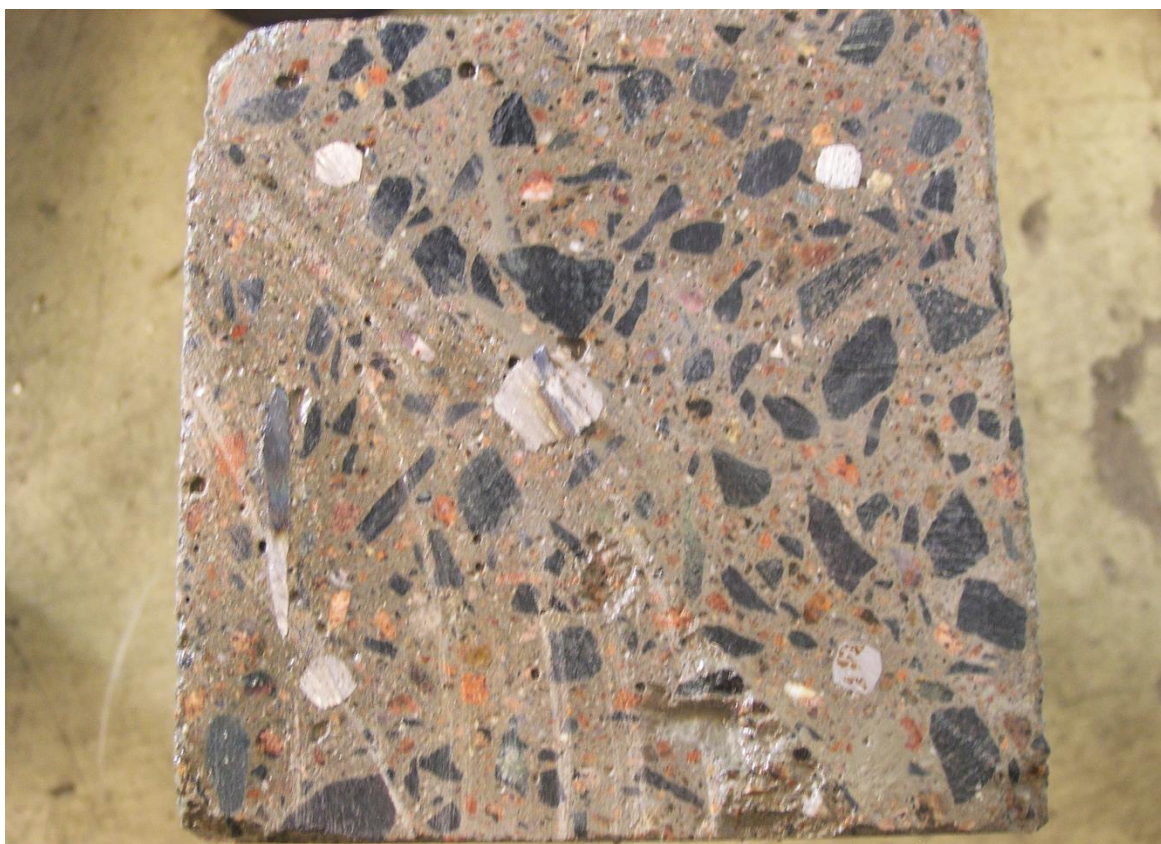


Kuva 3: Koekappale TBT, valetun paalun vapaa pinta on kuvassa oikealla



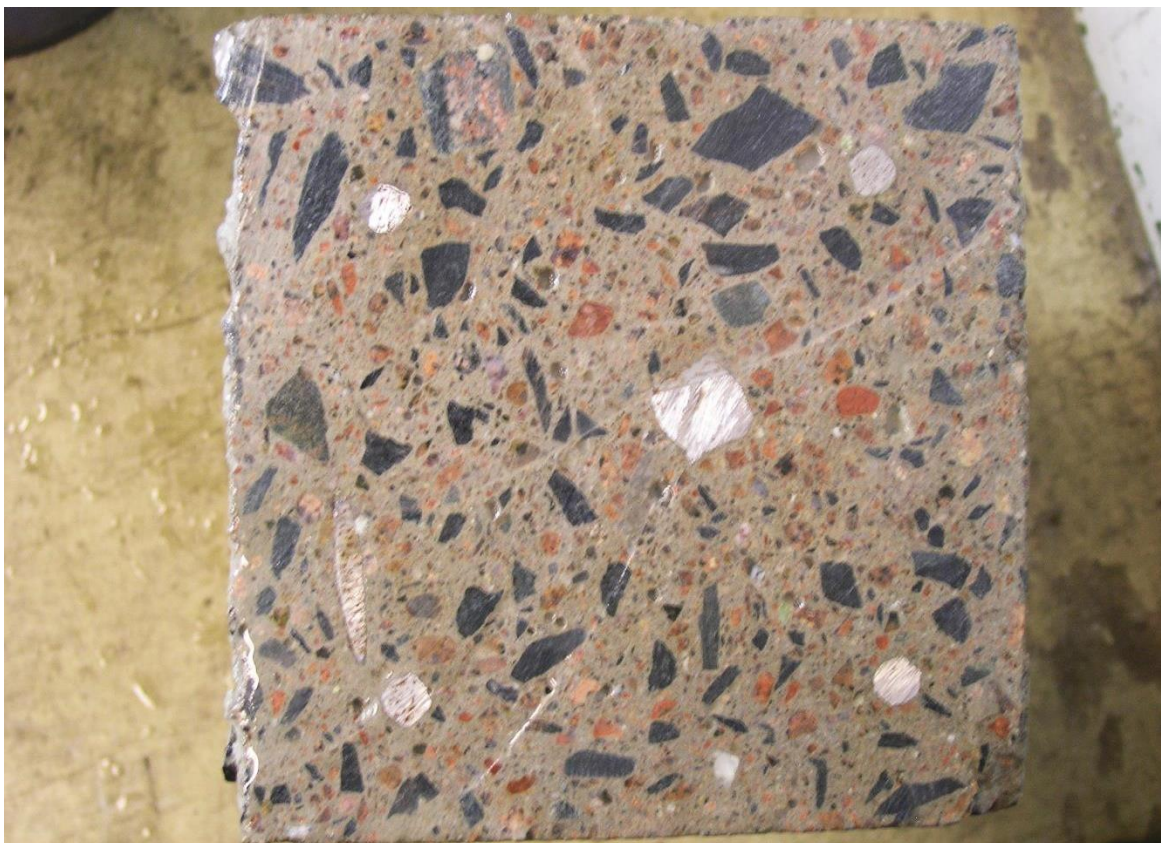


Kuva 4: Koekappale TBT, valetun paalun vapaa pinta on kuvassa vasemmalla



Kuva 5: Koekappale TBT, valetun paalun vapaa pinta on kuvassa alhaalla





Kuva 6: Koekappale TBT, valetun paalun vapaa pinta on kuvassa vasemmalla

## 6. Suositus koeohjelmaksi

Siinä vaiheessa kun betonipaalut 5 ja 15 vuoden testijaksojen kuluttua nostetaan ylös, on luonnollista että niiden lujuus on muuttunut eniten juuri paalun pintakerroksissa. Tämän vuoksi lujuuden muutoksen testaamiseen kimmovasaratestaus soveltuu erikoisen hyvin. Kimmovasaratestausten tueksi on syytä lisäksi harkita paaluista sahattavien kuutioiden puristuslujuuden testaamista. Paalujen taivutuskokeet saattavat olla vähäisen koekappalemäärän ja palkkien massiivisuuden vuoksi mahdottomia suorittaa. Lisäksi on huomattava, että betonipaalun täytetyn maan osuudelta eli aina noin 4m:n syvyyteen asti on paalun lujuus mitattava ainakin 30cm:n välein. Kimmovasaramittaus soveltuu tähän mittaukseen parhaiten. Tietenkin saven osuudelta eli syvemmällä kuin tuo mainittu 4m ollut paalun osuus voidaan mitata harvennetuin välein. Kimmovasaratestausta tulee suorittaa myös betonin syvyysuunnassa, jolloin paalun pinnalta poistetaan hallitun paksuisia kerroksia ja paljastuneelta pinnalta mitataan betonin lujuutta kimmovasaralla.

Paalujen mekaanisen testauksen lisäksi ylös nostettujen paalujen betonin muuttunutta rakennetta kannattaa mitata esim. alkuaineanalyysein ja röntgenmittauksin kerroksista betonipaalun pinnan alta.

**Liitteet:**

Liite 1: Teräsbetonipaalujen piirustus/ Lujabetoni Oy

Liite 2: Kimmovasaran käyttäjän ohje

Liite 3: Paalutusmuistio

Liite 4: SFS EN 12794+A1+AC Betonivalmisosat, Perustuspaalut

Liite 5: Tuotelehti PO-2011 mukaiseen paalutustyöhön, RT 2011

Liite 6: Väitöskirja Olli-Pekka Kari, Long-term ageing of concrete structures in Finnish rock caverns as application facilities for low- and intermediate-level nuclear waste, Aalto University School of Engineering Department of Civil and Structural Engineering

Taulukko 1; Kimmoasaramittausten tulokset., lujuusarvon määrittämiseen käytetty, edellä esitetyn kaavan mukaan laskettu arvo on merkitty taulukkoon keltaisella.

<b>Betonitestaus 16-20.11.2015</b>						
Jussi Laurila, TTY Materiaalioppi						
Laite: Concrete test hammer C181, Controls Italy/TTY Rakennustekniikka						
Kokeet suoritettiin laite pystyasennossa betonista lattiaa vasten						
Kasteltu betonipinta, liotus vähintään 15min						
TBT 1/ sivu 1:	Ylin rivi pinnan puolelta				Average:	
	26	27	27	28	27	Kk=fcm-1.48xs
	33	31	26	27	29.25	Kk=fcm+4
	28	31	30	31	30	
	30	30	30	31	30.25	Tulos: Lujuus: kg/cm2
Average:	29.125				26.0	240
STDEV:	2.125245				30.0	
TBT 1/ Pohja:						
	31	34	28	30		
	30	27	33	26		
	31	32	32	33		
	30	30	36	34		
					Tulos:	Lujuus: kg/cm2
Average:	31.0625				27.1	255
STDEV:	2.67005				30.0	
TBT 1/ sivu 2:						
	32	30	31	28	30.25	
	31	31	28	31	30.25	
	32	34	31	31	32	
	30	30	29	28	29.25	Tulos: Lujuus: kg/cm2
Average:	30.4375				28.0	270
STDEV:	1.631717				32.0	
TBT 2/ sivu 1:						
	30	34	34	36	33.5	
	32	33	30	33	32	
	31	33	33	32	32.25	
	34	34	32	31	32.75	Tulos: Lujuus: kg/cm2
Average:	32.625				30.2	300
STDEV:	1.627882				34.0	
TBT 2/ Pohja:						
	32	36	32	32		
	35	34	36	35		
	34	34	32	34		
	38	28	33	30		
					Tulos:	Lujuus: kg/cm2
Average:	33.4375				29.8	300
STDEV:	2.448639				32.0	
TBT 2/ sivu 2:						
	33	32	30	31	31.5	
	34	32	31	28	31.25	
	34	32	33	31	32.5	

	31	30	34	32	31.75	Tulos:	Lujuus: kg/cm2
Average:	31.75					29.3	290
STDEV:	1.65328					32.0	
TBT 3/ sivu 1:	Ylin rivi pinnan puolelta						
	26	29	29	30	28.5		
	31	32	32	33	32		
	30	28	33	38	32.25		
	32	32	31	35	32.5	Tulos:	Lujuus: kg/cm2
Average:	31.3125					27.1	250
STDEV:	2.82179					30.0	
TBT 3/ Pohja:							
	30	30	27	40	31.75		
	28	28	27	26	27.25		
	25	30	28	26	27.25		
	29	31	26	25	27.75	Tulos:	Lujuus: kg/cm2
Average:	28.5					23.2	190
STDEV:	3.596294					29.0	
TBT 3/ sivu 2:	Ylin rivi pinnan puolelta						
	30	30	25	33	29.5		
	32	31	30	27	30		
	33	31	32	30	31.5		
	24	28	30	33	28.75	Tulos:	Lujuus: kg/cm2
Average:	29.9375					25.9	240
STDEV:	2.719528					28.0	
TBT 4/sivu 1:	Ylin rivi pinnan puolelta						
	31	32	28	28	29.75		
	34	32	29	31	31.5		
	32	32	32	28	31		
	32	28	24	29	28.25	Tulos:	Lujuus: kg/cm2
Average:	30.125					26.4	245
STDEV:	2.526526					28.0	
TBT 4/ Pohja							
	32	31	32	33	32		
	33	31	31	33	32		
	30	36	30	33	32.25		
	32	30	29	32	30.75	Tulos:	Lujuus: kg/cm2
Average:	31.75					29.2	290
STDEV:	1.693123					33.0	
TBT 4/ sivu 2:	Ylin rivi pinnan puolelta						
	32	30	30	30	30.5		
	32	34	32	32	32.5		
	32	30	27	28	29.25		
	32	30	31	30	30.75	Tulos:	Lujuus: kg/cm2
Average:	30.75					28.2	270



STDEV:	1.732051					31.0		
TBT 5/ sivu 1	Ylin rivi pinnan puolelta							
	31	31	29	38	32.25			
	32	32	33	32	32.25			
	27	27	28	32	28.5			
	31	30	29	32	30.5	Tulos:	Lujuus: kg/cm2	
Average:	30.875					26.9	250	
STDEV:	2.680174					31.0		
TBT 5/ Pohja:								
	31	32	34	29	31.5			
	32	32	31	34	32.25			
	33	36	32	32	33.25			
	33	30	32	30	31.25	Tulos:	Lujuus: kg/cm2	
Average:	32.0625					29.5	290	
STDEV:	1.730848					33.0		
TBT 5/ sivu 2:	Ylin rivi pinnan puolelta							
	30	32	29	28	29.75			
	30	27	32	33	30.5			
	29	29	29	32	29.75			
	33	28	32	32	31.25	Tulos:	Lujuus: kg/cm2	
Average:	30.3125					27.4	260	
STDEV:	1.956826					31.0		
TBT 6: sivu 1	Ylin rivi pinnan puolelta							
	30	27	26	33	29			
	34	32	30	29	31.25			
	34	31	34	34	33.25			
	36	34	32	32	33.5	Tulos:	Lujuus: kg/cm2	
Average:	31.75					28.1	270	
STDEV:	2.46306					30.0		
TBT 6/ Pohja:								
	27	24	32	33	29			
	30	28	32	33	30.75			
	31	28	28	30	29.25			
	30	28	30	32	30	Tulos:	Lujuus: kg/cm2	
Average:	29.75					26.1	240	
STDEV:	2.46306					28.0		
TBT 6/ sivu 2:	Ylin rivi pinnan puolelta							
	29	31	28	32	30			
	30	29	29	28	29			
	34	32	32	34	33			
	34	28	31	34	31.75	Tulos:	Lujuus: kg/cm2	
Average:	30.9375					27.5	260	
STDEV:	2.294014					32.0		

Kalibrointiseinä, Materiaaliopin raskaan hallin seinäpalkki							
Muista poiketen vaakamittaus ja kuiva maalattu sileä seinä							
	46	46	45	44			
	44	45	45	44			
	38	43	43	44			
	45	48	47	45	Tulos:	Lujuus: kg/cm <sup>2</sup>	
Average:	44.5				41.3	440	
STDEV:	2.19089				42.0		

## LIITE 6: SEINÄMÄVAHVUUSMITTAUSTEN TULOKSET

### Maalatut teräsputkipaaluelementit

Elementin tunniste	Piste 1 (mm)	Piste 2 (mm)	Piste 3 (mm)	Piste 4 (mm)	Piste 5 (mm)
1	7,83	7,77	7,92	7,88	7,87
2	7,73	7,80	7,90	7,83	7,86
3	7,72	7,76	7,89	7,80	7,83
4	7,72	7,77	7,91	7,81	7,82
5	7,71	7,72	7,81	7,80	7,83
6	7,78	7,76	7,88	7,88	7,89
7	7,77	7,71	7,90	7,83	7,84
8	7,76	7,76	7,91	7,86	7,88
9	7,74	7,75	7,86	7,82	7,85
10	7,65	7,69	7,80	7,84	7,83
11	7,71	7,76	7,86	7,81	7,84
12	7,75	7,73	7,85	7,83	7,83
13	7,79	7,81	7,89	7,85	7,87
14	7,66	7,73	7,86	7,84	7,81
15	7,64	7,69	7,79	7,77	7,80
16	7,74	7,78	7,92	7,86	7,84
17	7,71	7,77	7,86	7,89	7,85
18	7,79	7,84	7,96	7,92	7,90
19	7,68	7,76	7,87	7,84	7,83
20	7,79	7,82	7,94	7,92	7,89
21	7,69	7,74	7,84	7,81	7,78
22	7,72	7,77	7,89	7,88	7,87
23	7,70	7,74	7,84	7,84	7,85
24	7,74	7,78	7,91	7,84	7,89
25	7,72	7,78	7,88	7,85	7,86
<b>Keskiarvo</b>	7,73	7,76	7,88	7,84	7,85
<b>Keskihajonta</b>	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03

**Maalaamattomat teräsputkipaaluelementit**

<b>Elementin tunniste</b>	<b>Piste 1 (mm)</b>	<b>Piste 2 (mm)</b>	<b>Piste 3 (mm)</b>	<b>Piste 4 (mm)</b>	<b>Piste 5 (mm)</b>
26	7,75	7,72	7,88	7,81	7,88
27	7,76	7,74	7,92	7,92	7,84
28	7,80	7,76	7,90	7,87	7,88
29	7,80	7,76	7,86	7,88	7,89
30	7,82	7,77	7,93	7,90	7,89
31	7,89	7,85	7,97	7,90	7,97
32	7,83	7,82	7,88	7,88	7,85
33	7,81	7,83	7,87	7,92	7,89
34	7,86	7,85	7,85	7,90	7,90
35	7,85	7,84	7,91	7,93	7,93
36	7,80	7,82	7,93	7,89	7,90
37	7,80	7,81	7,92	7,90	7,91
38	7,85	7,83	7,93	7,91	7,93
39	7,81	7,75	7,85	7,86	7,84
40	7,81	7,82	7,88	7,87	7,88
41	7,74	7,83	7,89	7,85	7,92
42	7,72	7,76	7,86	7,85	7,85
43	7,74	7,81	7,89	7,91	7,85
44	7,23	7,25	7,91	7,83	7,87
45	7,75	7,82	7,88	7,85	7,92
46	7,78	7,77	7,88	7,85	7,88
47	7,70	7,80	7,87	7,85	7,87
48	7,75	7,82	7,89	7,86	7,85
49	7,80	7,80	7,86	7,85	7,87
50	7,21	7,28	7,87	7,86	7,88
<b>Keskiarvo</b>	7,75	7,76	7,89	7,88	7,89
<b>Keskihajonta</b>	0,16	0,15	0,03	0,03	0,03